

Diseño de un alternador de imanes permanentes para un aerogenerador de uso rural



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Iñigo Castillejo López
Tudela a 10 de junio de 2014

...A

Mi familia

Mi Padre (Q.E.P.D.), para el que lo más importante fue siempre mi educación

Mi Madre, que me ha apoyado durante estos años

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi familia, por el apoyo que he tenido por su parte desde mi más tierna infancia.

A mi tutor del T.F.G. el Dr. Ricardo J. Ortega Hertogs, quien me ha acompañado, guiado y motivado durante la realización de este trabajo y sin cuya ayuda inestimable esto no hubiera sido posible. Por su enorme dedicación y entrega y su inquebrantable compromiso con la investigación y la docencia.

Al profesor Francisco Javier Bea Montes, cotutor de mi T.F.G. por haber creído en mi propuesta y por su apoyo.

Al técnico de taller Ángel Jaraba por su atención.

A todos los profesores que he tenido durante el transcurso de esta carrera de los que he aprendido mucho tanto en el plano académico como en el plano humano.

A todos mis compañeros durante esta carrera, que en uno u otro momento compartieron conmigo e hicieron más placentero el estudio de la misma.

A todo el personal del campus de Tudela por hacernos el día a día más agradable.

Resumen

Palabras clave: Alternador, imanes permanentes, energía eólica, magnetismo, electromagnetismo, regulador de Watt

El presente trabajo consiste en el diseño, prototipado y ensayo de un alternador de imanes permanentes para su aplicación en un aerogenerador de baja potencia como los que se utilizan en el entorno rural.

Se trata de un alternador de flujo axial sometido a ensayo en diferentes condiciones en un intento de ofrecer luz acerca de la relevancia de la utilización de un material u otro (hierro, aire, etc...) en el interior de las bobinas inductoras. Los alternadores de este tipo como el que se propone en la (Ref.13), constan de bobinas huecas o con un núcleo con propiedades magnéticas cercanas a las del vacío.

Los resultados mostraron que si bien con un núcleo de hierro, la fuerza electromotriz inducida en los carretes es mayor, también lo es el par necesario para poner el sistema en movimiento y en consecuencia también la potencia de viento necesaria.

A pesar de ello, los datos obtenidos permiten ver que a una distancia adecuada los resultados son comparables por lo que abre la puerta a la experimentación con materiales magnéticamente más blandos, de los cuales no dispusimos para nuestros ensayos, así como para el diseño de algún sistema compensador del par extra ejercido cuando se utilizan núcleos magnéticos.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Motivación.....	8
2. Antecedentes	14
2.1. Generalidades de la conversión electromecánica de la energía eólica.....	14
2.1.1. Energía eólica.....	14
2.1.2. Relación potencia mecánica – velocidad del viento.....	15
2.1.3. La hélice.....	20
2.2. Generalidades de la generación eléctrica.....	22
2.2.1. Generalidades de magnetismo de la materia.....	22
2.2.2. Fuerza electromotriz inducida.....	28
3. Descripción del proyecto	30
3.1. El prototipo de pruebas.....	33
3.1.1. La estructura.....	34
3.1.2. Los rotores.....	36
3.1.3. El estátor.....	40
3.1.3.1. Las bobinas.....	42
3.1.3.2. Los núcleos de acero.....	43
3.2. Los ensayos.....	44
3.2.1. Equipos de medición.....	45
3.2.2. Resultados.....	47
3.3. Conclusiones.....	54
3.3.1. Posibles diseños alternativos y mejoras.....	56

4. Bibliografía y Software utilizado	61
5. Anexos	62
5.1. Datos fabricante imanes.....	63
5.2. Chapa negra.....	67

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo pretende en primer lugar, ser una herramienta para profundizar en el conocimiento de los fundamentos de la generación eléctrica a través de la energía eólica por parte de quien lo escribe.

Previo redacción de este trabajo, ha sido necesaria una gran investigación bibliográfica para comprender las cuestiones relativas a la energía eólica tales como aerodinámica, mecánica, mecánica de fluidos, magnetismo, electromagnetismo, electricidad... pero este trabajo no pretende ser una recopilación de conocimientos de otras personas sino tratar de aportar algo, por pequeño que sea, al estado del arte del momento.

Se ha decidido darle a este trabajo un enfoque experimental, por lo que se ha construido un prototipo de alternador de imanes permanentes para su aplicación en un aerogenerador de baja potencia con el que se han hecho diferentes ensayos en el laboratorio. En esta memoria se explican el desarrollo que ha tenido este trabajo y los resultados y las conclusiones que se han obtenido de él. En cuanto a las cuestiones teóricas que lo fundamentan, se ha tratado de ser lo más breve posible ya que en la bibliografía podrá encontrar el lector respuesta más amplia a todas ellas.

1.1. Motivación

A la hora de decidir hacer este trabajo, fue clave la conciencia de la importancia de ir cambiando nuestro sistema energético de manera que no solamente nos haga ser menos dependientes de los combustibles fósiles sino que además sea más respetuoso con el medio ambiente.

La energía, como recurso que es, debe contribuir a estos tres pilares de la sostenibilidad:

- Sostenibilidad social. La energía proporciona bienestar social porque nos ofrece servicios de gran valor: confort, movilidad, empleo, etc. Por este motivo se debe garantizar el acceso de toda la población a la energía en condiciones adecuadas de calidad, seguridad y coste.
- Sostenibilidad económica. La energía se halla presente en toda actividad económica, es un factor determinante de la competitividad empresarial y es en sí misma una actividad económica (empresas del sector energético en todas sus ramas).
- Sostenibilidad ambiental. El modelo energético debe ser respetuoso con el medio ambiente, a fin de procurar su conservación.

En Navarra contamos con un sistema energético privilegiado en este sentido. A continuación, se representa en la Fig. 1.1 cómo se distribuye por tipos la producción de la energía eléctrica en Navarra a fecha de 2009.

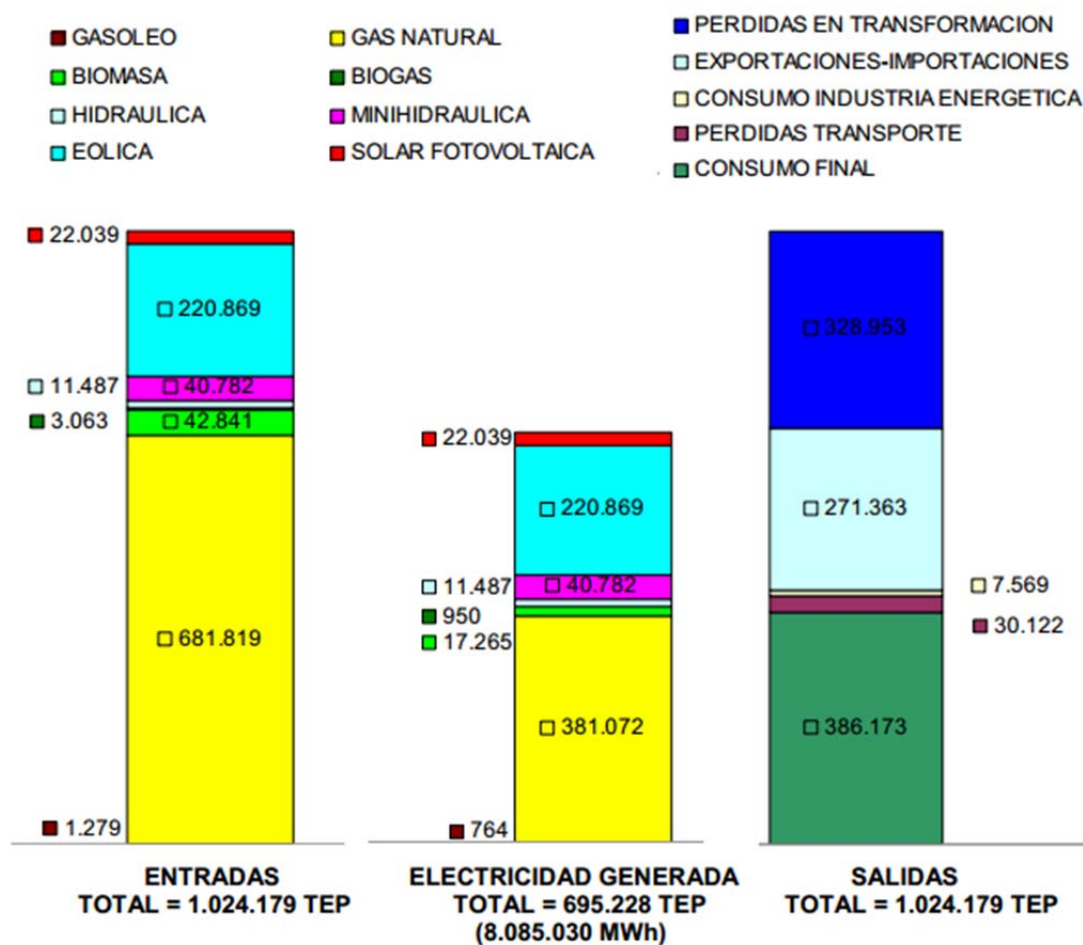


Fig. 1.1: Generación eléctrica en Navarra en 2009. Extraído del *Plan Energético de Navarra horizonte 2020*. (Ref. 15)

Conocidos los datos en cuanto a generación eléctrica en Navarra, se han tomado los métodos de generación más significativos en Navarra, como son: la generación eléctrica con biomasa, como la central de Sangüesa, la producida con gas natural, que se produce exclusivamente en las centrales térmicas de Castejón, la energía hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica, y se ha comparado la influencia que tiene cada uno de estos tipos de generación eléctrica en los principales indicadores medioambientales. Para ello, se ha empleado el programa informático de análisis de ciclo de vida GaBi. Para más información consultar la (Ref. 17)

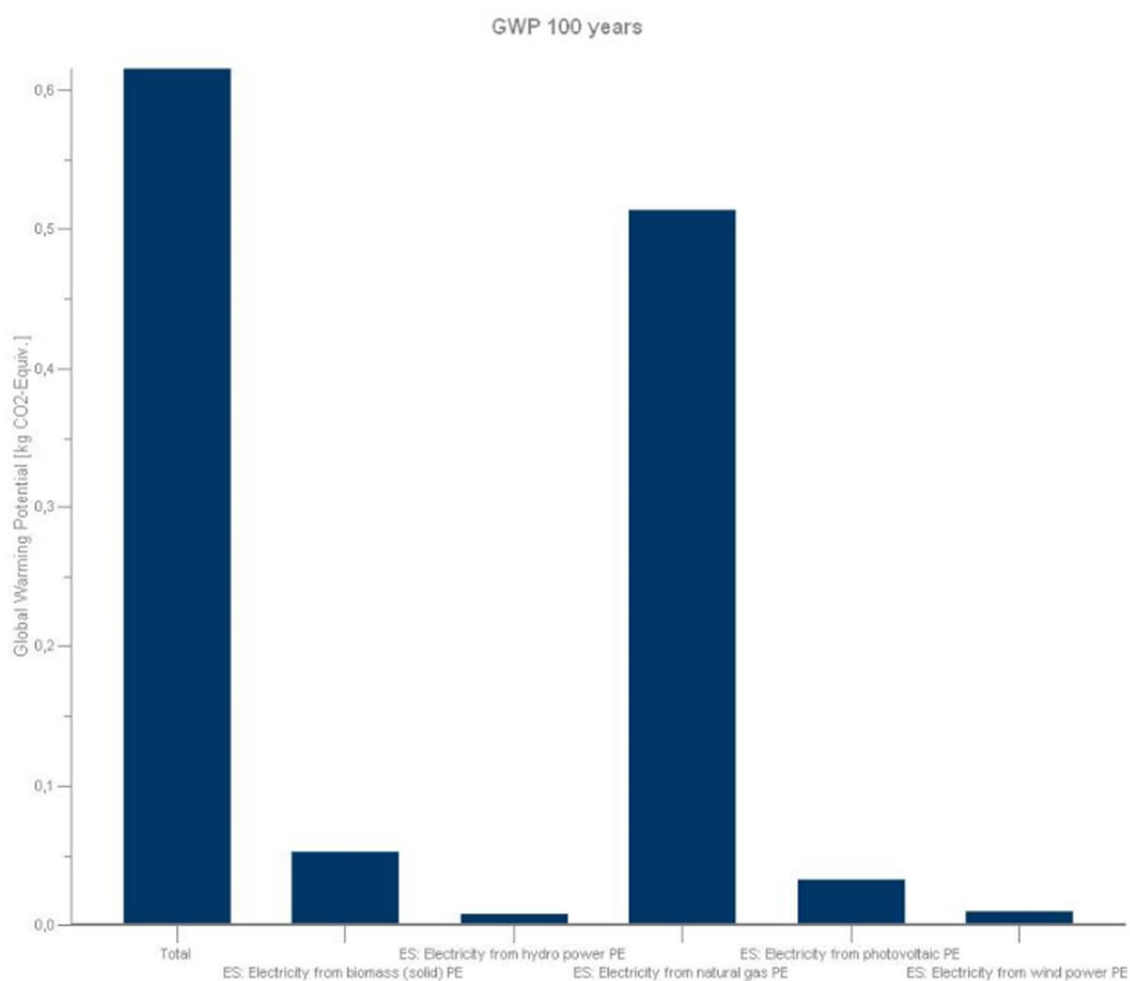


Fig. 1.2

Así, podemos observar que:

-La generación eléctrica con gas natural, es la que más contribuye de todas, con diferencia, al cambio climático y evidentemente al agotamiento de los recursos fósiles.

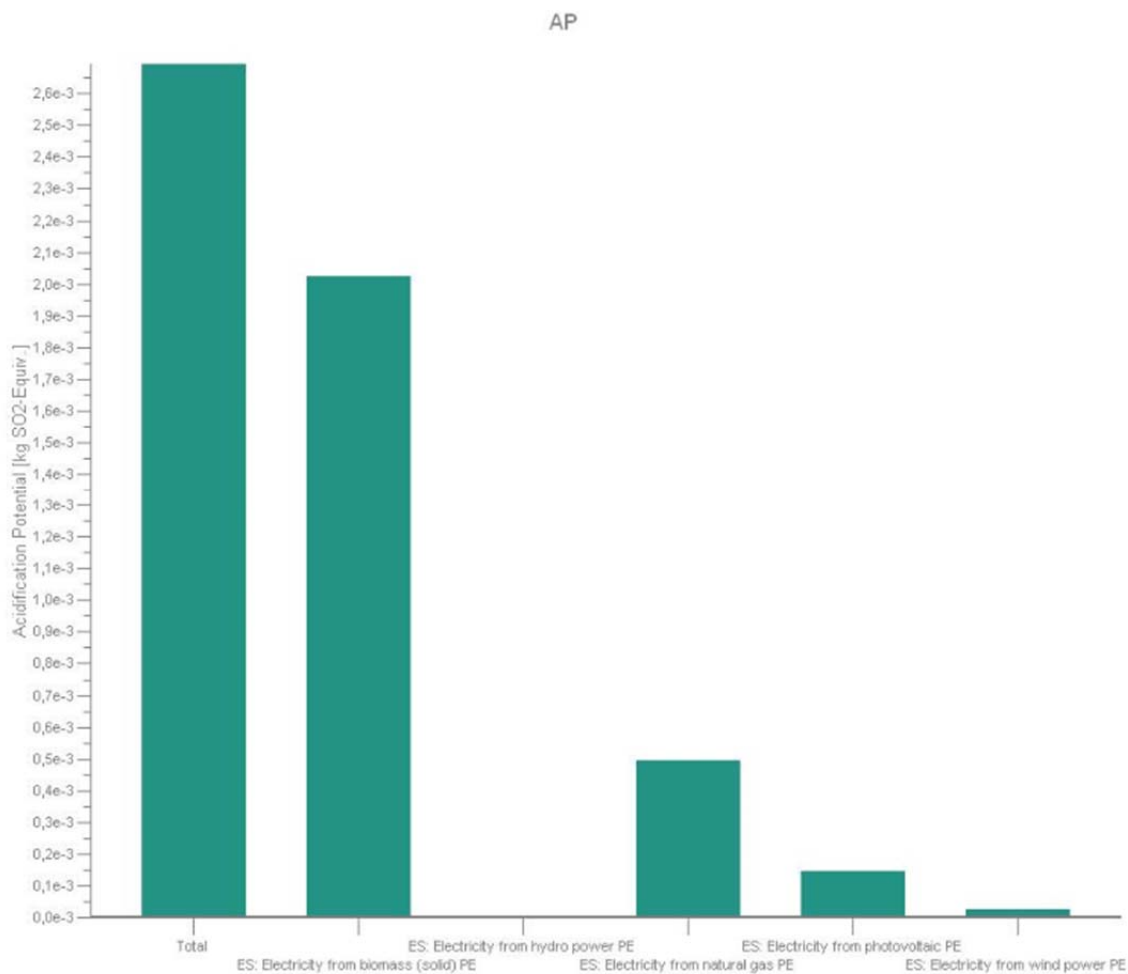


Fig. 1.3

-La electricidad que se produce con biomasa parece en principio de las más contaminantes, pues es la que más contribuye a la acidificación, a la eutrofización, a la toxicidad humana, terrestre, marina o del agua potable, así como a la creación de ozono fotoquímico.

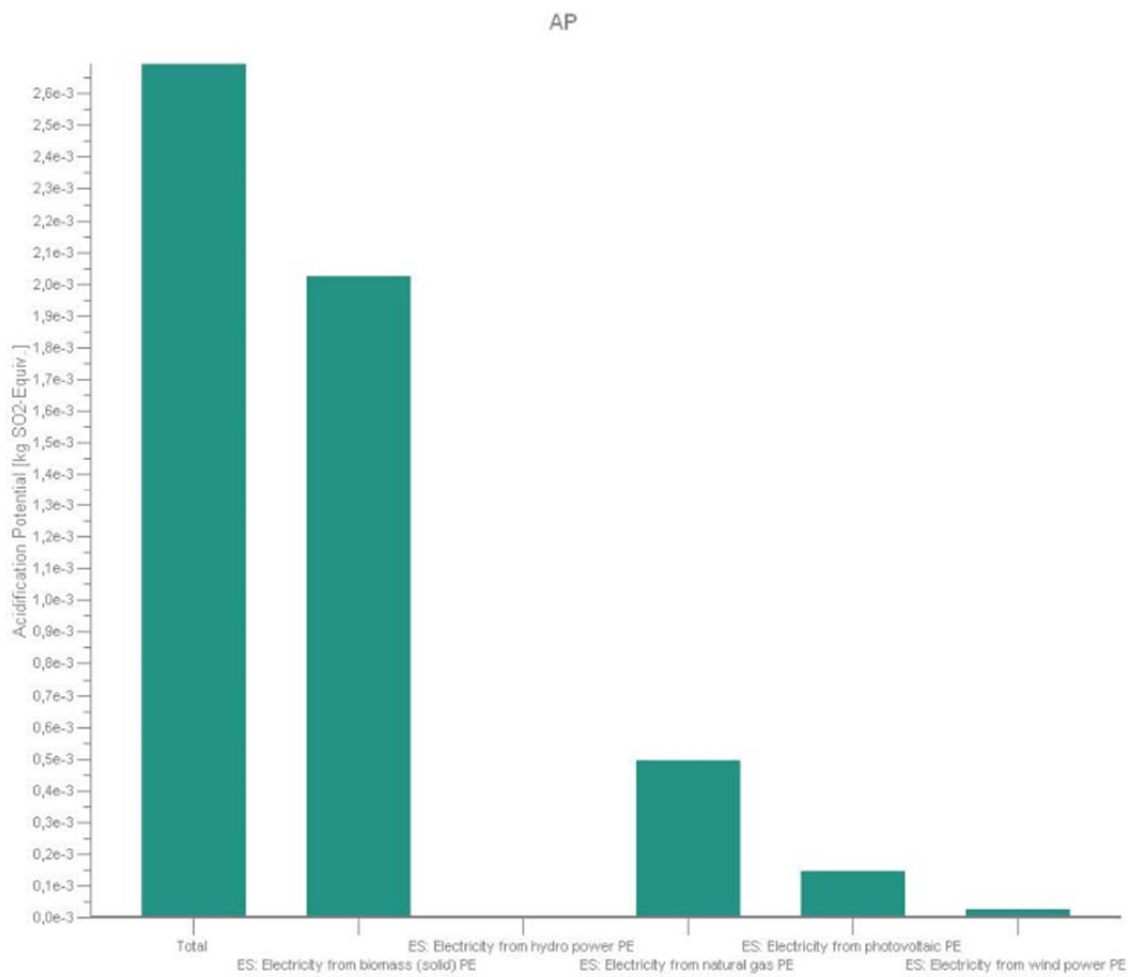


Fig. 1.4

-Por su parte, la energía fotovoltaica, debido a los componentes necesarios para la creación de las placas fotovoltaicas, es la que más contribuye a la destrucción de la capa de ozono.

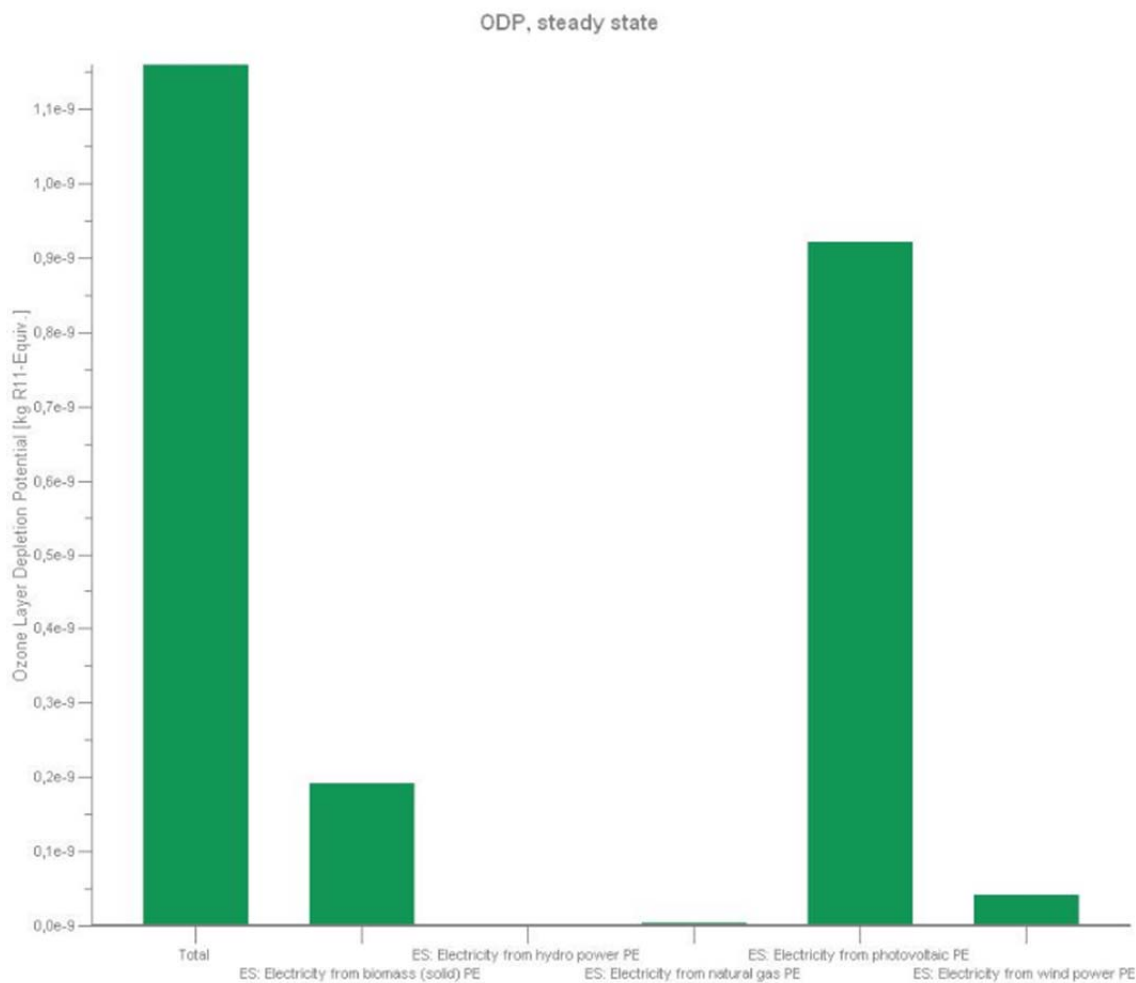


Fig. 1.5

Puede verse así, que las energías eólica e hidroeléctrica se nos muestran como las más ecológicas y he aquí donde radica la motivación a la hora de hacer este trabajo. En él, más allá de las cuestiones de mejora y de investigación que abre a partir del prototipo fabricado, propone un modelo de alternador de imanes permanentes fácil de construir y económico, capaz de responder a las necesidades energéticas de puntos aislados de un consumo no demasiado alto, si bien se podría conseguir una mayor producción energética multiplicando el número de alternadores o redimensionando el modelo. Este prototipo que en principio se diseñó pensando en las turbinas eólicas, podría ser aplicable a mini-turbinas hidráulicas de la misma manera. Además, el hecho de suplir puntos alejados de la red de suministro principal evita las pérdidas energéticas en el transporte.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Generalidades de la conversión electromecánica de la energía eólica.

El presente capítulo tiene como finalidad el proporcionar ciertos conocimientos básicos al lector con respecto a la energía eólica y los métodos utilizados para realizar su conversión electromecánica, dando especial énfasis en la utilización de generadores síncronos, que corresponden a la propuesta realizada en este trabajo.

2.1.1. Energía eólica

La energía eólica se considera una forma indirecta de energía solar. Entre el 1 y 2% de la energía proveniente del Sol se convierte en energía cinética dando origen al viento. Esto es por el calentamiento desigual del aire en distintas regiones, calentamiento que provoca una variación en la densidad del mismo y por tanto diferencias en la presión ejercida por la masa de aire en la superficie terrestre. Luego, son estas diferencias de presión las que producen los movimientos de grandes masas de aire, que son finalmente el viento que nosotros percibimos en la superficie. La energía cinética de estas masas de aire, el viento, puede transformarse en energía mecánica útil. La energía eólica, transformada en energía mecánica, ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala sólo desde

mediados de la década del 70, en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles.

Una de las características de este recurso es su condición aleatoria y variable, por cuanto depende de condiciones atmosféricas que no pueden ser controladas ni modificadas. Esto lleva a que se requieran exhaustivas mediciones como condición previa para el desarrollo de proyectos destinados a su aprovechamiento.

2.1.2. Relación potencia mecánica – velocidad del viento

El funcionamiento básico de un aerogenerador se podría resumir como sigue: Un aerogenerador capta la energía cinética del viento por medio del rotor y aspas, para posteriormente transformar esta energía cinética en energía eléctrica. Luego, si se desea conocer la potencia que puede tener un aerogenerador, es necesario especificar la energía cinética proporcionada por el viento que se dispone (Ref. 1.)

La energía cinética es igual a

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V_1^2$$

donde m es la masa de las partículas del aire y V_1 la velocidad de la misma, Fig. 2.1.1. A su vez, la masa que atraviesa una sección A , perpendicular a la dirección del viento, es:

$$m = \rho A l$$

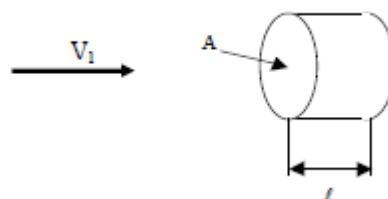


Figura 2.1

donde ρ es la densidad del aire y l el desplazamiento de las partículas. Consecuentemente, la energía cinética que pasa por A es

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho A l \cdot V_1^2$$

Potencia disponible y potencia captada

La potencia disponible en el viento correspondiente a la masa de aire en movimiento es la energía cinética por unidad de tiempo

$$P_d = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho A V_1 V_1^2 = \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

Donde $V_1 = l/t$

Sólo una parte de esta potencia disponible en el viento puede ser captada por la hélice. La potencia captada P_c será

$$P_c = C_p P_d = C_p \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia que indica la capacidad de la hélice para captar la energía del viento.

Tubo de Viento

Para comprender qué sucede cuando el viento atraviesa una turbina, comenzaremos por estudiar un tubo de corriente, usando la teoría de cantidad de movimiento axial. Esta teoría, si bien es simple y no tiene en cuenta varios efectos que ocurren realmente, sirve lo suficiente como para visualizar los principales fenómenos que se desarrollan y los variados estados de funcionamiento de la hélice.



Figura 2.2

En la Fig. 2.2 se ha representado una línea de corriente de un fluido incompresible. Para esta línea, la ecuación de Bernoulli dice que

$$p_a + \frac{1}{2} \rho V_a^2 = p_b + \frac{1}{2} \rho V_b^2 = p_t$$

donde p es presión estática, p_t presión total, que es constante a lo largo de la línea de corriente, ρ la densidad y V la velocidad, en los puntos a y b .

Los estudios correspondientes al tubo de viento, fueron iniciados por Rankine y luego seguidos por Froude (Ref. 2), utilizando un modelo idealizado con una hélice de un número infinito de palas, que no producen rotación en la estela ni ocasionan pérdidas por fricción con el aire.

Se considera un volumen de control limitado por los extremos (1) y (4) y por la superficie externa del flujo de las líneas de corriente que pasan por las áreas A_1 y A_4 , Fig. 2.3. Las presiones en los extremos son prácticamente iguales a las del flujo no perturbado y por lo tanto tomaremos $p_1 = p_4$.

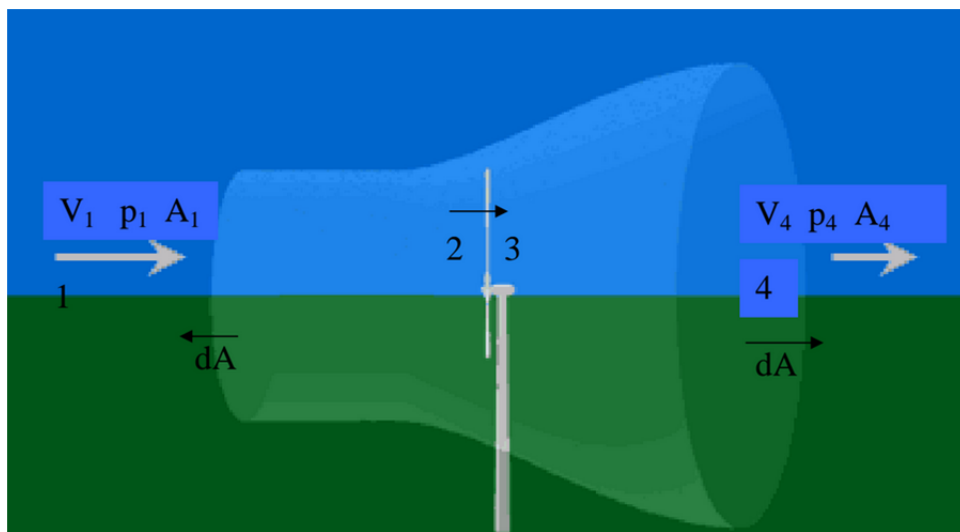


Figura 2.3

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones (1) y (2), se obtiene

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

Análogamente, entre (3) y (4)

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2$$

De donde

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad 2.1$$

Por la ecuación de la cantidad de movimiento axial para flujo estacionario en régimen laminar

$$\mathbf{F} = \int \mathbf{V}\rho(\mathbf{V} \cdot d\mathbf{A})$$

Donde F es la fuerza exterior que actúa sobre el fluido y A es la superficie que envuelve al volumen de control. Integrando:

$$F = V_4\rho V_4 A_4 - V_1\rho V_1 A_1 = \rho A_d V(V_4 - V_1)$$

Ya que por continuidad del caudal

$$\rho V_4 A_4 = \rho V_1 A_1 = \rho V A_d$$

Donde A_d es el área del disco de la hélice. Entonces la fuerza que ejerce el aire sobre la hélice es

$$F_{sd} = \rho A_d V(V_1 - V_4) \quad 2.2$$

La cual también es igual a

$$F_{sd} = A_d(p_2 - p_3) \quad 2.3$$

Entre las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) se deduce que la velocidad V que cruza la hélice es

$$V = \frac{V_1 + V_4}{2}$$

Esta velocidad axial V que atraviesa el disco de la hélice, es menor que la velocidad del viento y se puede representar introduciendo un factor de interferencia a .

$$V = V_1(1 - a)$$

Y entonces

$$V_4 = V_1(1 - 2a)$$

A su vez, la potencia captada por la hélice es el producto de la fuerza que el aire ejerce sobre la hélice, ecuación (2.1), multiplicada por la velocidad del aire a través del disco de la hélice

$$P_c = F_{sd} \cdot V = \rho A_d V (V_1 - V_4) V = 2\rho A_d V_1^3 a(1 - a)^2$$

Esta potencia pasa por un máximo cuando $a = \frac{1}{3}$. En este caso $V = \frac{2}{3}V_1$ y $V_4 = \frac{V_1}{3}$.

También habíamos visto que $P_c = C_p \frac{1}{2} \rho V_1^3 A_d$

De donde resulta $C_p = 4a(1 - a)^2$

Así, C_p alcanza el valor máximo cuando $a = \frac{1}{3}$

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,593$$

Este valor es el llamado coeficiente de Betz, quién lo dedujo en 1927 (Ref. 3) y expresa que de la potencia disponible en la corriente de aire sólo puede extraerse un 59,3%. Este límite de Betz ha sido cuestionado debido a la simplicidad del modelo empleado. Otro modelo más sofisticado propuesto por Sabinin (Ref. 4), que tiene en cuenta como condición de contorno un tubo de vórtices alrededor del flujo de aire que pasa por la hélice, estima un $C_{p\text{máx}}$ del 68,7 %.

Lo cierto es que en la práctica, con los mejores diseños, no se ha podido superar el 48 % y cuando por razones de fabricación se debe retocar el diseño óptimo, el $C_{p\text{máx}}$ baja a un 42 %. Este valor es considerado en producción como una marca tope, si bien la turbina Nordtank NTK 500/41 alcanza un $C_{p\text{máx}}$ de 50,5% según la (Ref. 5).

2.1.3. La hélice

Coeficiente de Potencia y Relación de Velocidades

El coeficiente de potencia C_p permite representar las principales características de las hélices, en combinación con otro importante parámetro adimensional λ . Este último establece la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1}$$

Donde: R = radio de la hélice en metros y
 ω = velocidad angular en rad/s.

λ combina las variables más importantes del diseño, de modo tal que el comportamiento de cualquier hélice queda totalmente definido al representarse el coeficiente de potencia C_p en función de la relación de velocidades λ .

La siguiente Fig. 2.4 representa el coeficiente de potencia frente a la relación de velocidades $\lambda = \frac{\omega R}{V_1}$ donde el eje vertical representa el coeficiente de potencia C_p y el eje horizontal la relación de velocidades λ .

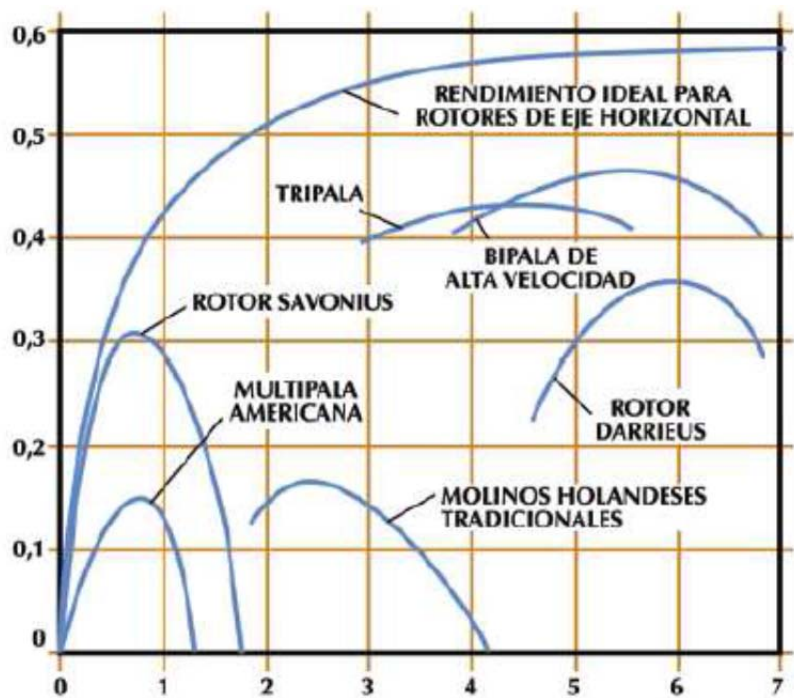


Figura. 2.4

En 1937, Glauert (Ref. 6) comenzó el estudio del rendimiento de las hélices para turbinas eólicas en función de λ . Posteriormente, este estudio fue completado por diversos autores y en la Fig. 2.4 se han representado los resultados de estos trabajos. Se puede observar que el molino multipala y el Savonius alcanzan su máxima eficiencia para un valor de λ aproximadamente igual a 1 mientras que la hélice de 2 palas o la Darrieus alcanzan su máximo para valores de $\lambda = 5$.

Puede notarse en la figura, que los máximos valores de C_p para turbinas rápidas con elevado λ , son mayores que las de bajo valor de λ .

Los valores de $C_{p\text{máx}}$ representan el rendimiento aerodinámico máximo de la hélice. Los altos valores de λ con los que se obtienen mayores rendimientos, se hacen significativos cuando se debe generar electricidad, ya que, por la característica propia de las máquinas eléctricas, requieren elevada velocidad de giro (Ref. 7).

2.2. Generalidades de la generación eléctrica

2.2.1. Generalidades del magnetismo de la materia

Todas las substancias exhiben algún tipo de comportamiento magnético, ya sea dia-, para-, ferro-, antiferro- o ferri magnetismo (Refs. 8,9,10). Aunque la taxonomía del magnetismo es aún mucho más variada (véanse, por ejemplo, las (Refs. 11, 12), esta subdivisión de comportamientos magnéticos de la materia es, en general, suficiente para catalogarlas. A continuación se describe de manera breve una serie de propiedades básicas del magnetismo y del comportamiento magnético de la materia, así como métodos experimentales de caracterización del mismo, que sitúan en perspectiva el presente proyecto, según la propuesta a la que nos hemos referido en la introducción, Cap. 1.

Dependencia térmica de la imanación y de la susceptibilidad

Para un material cuyo comportamiento magnético sea lineal con el campo aplicado H —los *dia*- y paramagnéticos¹—, la imanación es

$$M = \chi H$$

donde χ es la susceptibilidad magnética. La inducción magnética es entonces

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H$$

donde $\mu = \mu_0 \mu_r$ es la permeabilidad magnética (μ_0 es la del vacío), y la permeabilidad relativa del material es $\mu_r = 1 + \chi$. En los *diamagnéticos*, χ es negativa. En los *para*-ramagnéticos, χ es positiva.

¹ Un paramagnético es una substancia con momentos magnéticos no interaccionantes entre sí (ley de Curie) o débilmente interaccionantes entre sí (ley de Curie-Weiss) —véase la Fig. 2.6—. El campo aplicado orienta estos momentos en su dirección, por lo que el material se satura igualmente cuando todos están orientados. El campo magnético requerido depende fuertemente de la temperatura y es tan intenso que, a efectos prácticos, puede considerarse lineal el comportamiento de la imanación con el campo aplicado. Para una descripción más detallada, que no persigue en absoluto esta introducción, consúltese, por ejemplo, el libro de Chikazumi, (Ref. 8).

En ambos casos, $|\chi| \ll 1$, por lo que $\mu_r \approx 1$. Sin embargo, la dependencia con la temperatura de la susceptibilidad magnética es muy diferente en ambos casos, como se ilustra en la Fig. 2.5, lo que permite distinguir de qué tipo de material se trata.

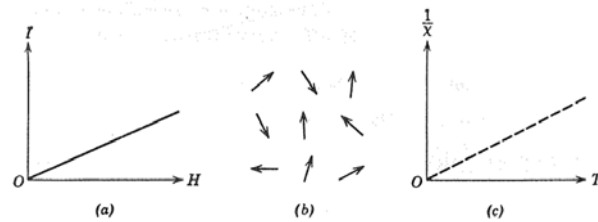


Figura 2.5: Paramagnetismo: (a) imanación $I = \mu_0 M$ frente al campo aplicado H . (b) Momentos magnéticos de la sustancia paramagnética. (c) Dependencia térmica de la susceptibilidad χ . De la (Ref. 8).

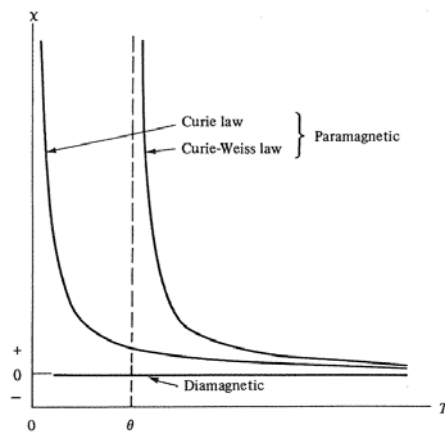


Figura 2.6: Dependencia térmica de la susceptibilidad en dia y paramagnéticos. Las sustancias cuyos momentos magnéticos constituyentes interaccionan débilmente entre sí, obedecen la ley de Curie-Weiss. La temperatura θ es una medida de la energía de la interacción. Si son no interaccionantes, la de Curie. De la (Ref. 9).

De manera genérica, la Fig. 2.7 ilustra la dependencia térmica de la imanación de saturación M_s para las sustancias *ferro*-, *ferri*- y *antiferromagnéticas*.

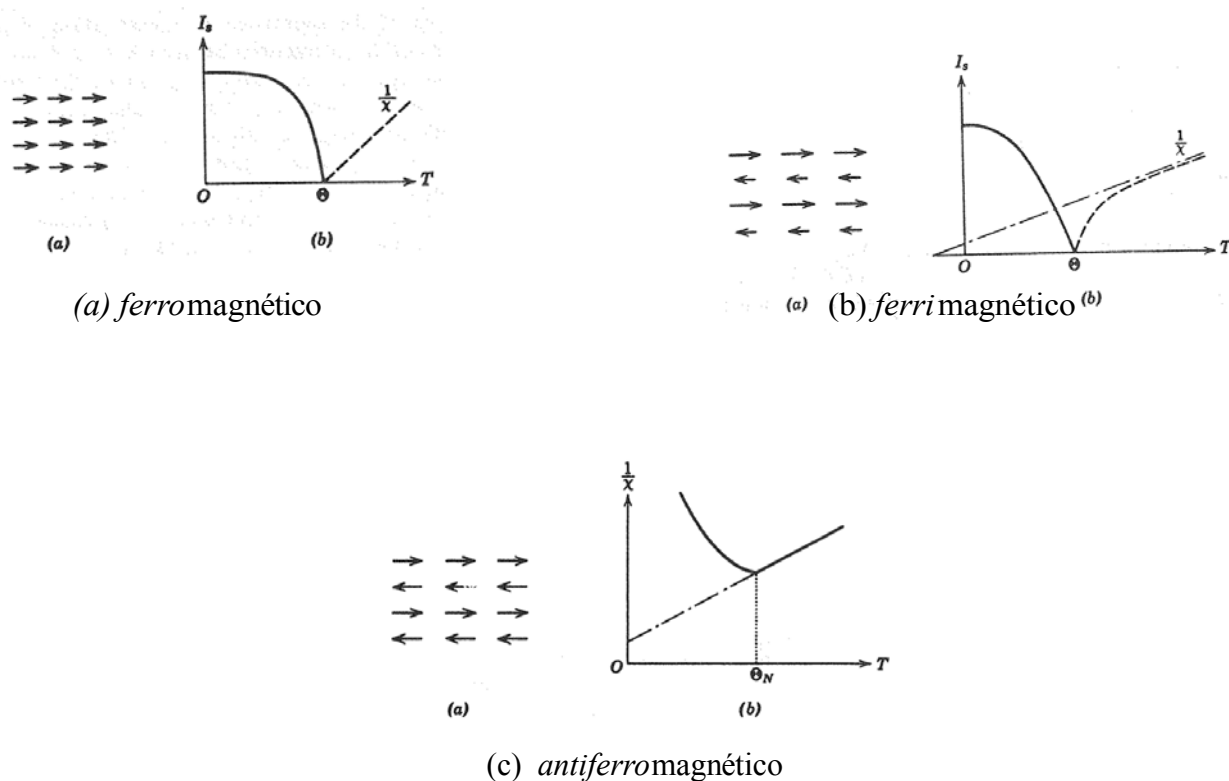


Figura 2.7: (a) Disposición de los momentos magnéticos atómicos. (b) Dependencia térmica de la imanación de saturación M_s y de la susceptibilidad χ , por encima de la temperatura Θ ó Θ_N de transición a la fase paramagnética. De la (Ref 8).

En un ferromagnético, los momentos magnéticos atómicos están alineados paralela- mente entre sí debido a intensas fuerzas de canje, cuyo origen no es clásico, sino cuántico. La substancia retiene una imanación permanente, sin la aplicación de un campo magnético, hasta la temperatura de transición Θ , por encima de la cual es un paramagnético. En un *ferrimagnético* hay dos subredes, cada una de las cuales es *ferromagnética*, pero la interacción de canje entre ellas es *antiferromagnética*, lo que fuerza a los momentos magnéticos a orientarse *antiparalelamente* entre sí. Una de las subredes es de mayor momento magnético que la otra, por lo que, en promedio, hay una imanación espontánea M_s no nula. La dependencia térmica de M_s en estas substancias es similar a la de los ferromagnéticos. (Sin embargo, las interacciones de canje ferro de cada una de las subredes no tienen por qué ser de igual intensidad. Cuando esto ocurre y la de mayor momento magnético se convierte en paramagnético antes —a una temperatura menor— que la otra, hay una temperatura llamada de compensación a la cual la imanación espontánea promedio de ambas se anula. A temperaturas mayores, aparece la imanación espontánea de la subred cuya interacción de

canje aún mantiene orientados los momentos magnéticos. Finalmente, ésta también se convierte en un paramagnético a una temperatura superior y desaparece la imanación espontánea. Esta parte no se ilustra en la Fig. 2.7. Puede consultarse en la (Ref. 8) bajo el epígrafe de “granates ferrimagnéticos” —*ferrimagnetic garnets*—. En un *antiferromagnético*, la interacción de canje mantiene a los momentos magnéticos orientados antiparalelamente entre sí, de manera que la imanación espontánea es nula. De ahí que no se ilustre una gráfica de la dependencia térmica de la imanación espontánea, que no posee. La sustancia puede imanarse, mediante la aplicación de un campo magnético suficientemente intenso, que sea capaz de vencer las intensas fuerzas de canje que mantienen a los momentos magnéticos orientados antiparalelamente entre sí. La dependencia térmica de la susceptibilidad es típicamente la mostrada en la Fig. 2.7. A la temperatura de transición, llamada de Néel, Θ_N , la sustancia se convierte en un paramagnético.

Materiales ferromagnéticos son, por ejemplo, el hierro, cobalto y níquel cristalinos, sus aleaciones e incluso las aleaciones vítreas² de estos con ciertos metaloides (boro, silicio, aluminio) que, particularmente, son materiales extraordinariamente blandos magnéticamente, con coercitividades tan bajas como $80 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ y permeabilidades superiores a 10^5 . Muchos materiales magnéticos duros, los imanes permanentes, son ferromagnéticos, como los compuestos $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ó SmCo_5 (son compuestos de tierras raras, con neodimio y samario, respectivamente). Su campo coercitivo es elevado (algo mayor de 1 tesla en los compuestos de tierras raras mencionados, (Ref. 12). Algunos óxidos son también ferromagnéticos, como el CrO_2 y el EuO (Ref. 8).

Materiales antiferromagnéticos son muchos óxidos de los metales de transición, como el MnO , FeO , CoO , NiO . También metales de los elementos de tierras raras, como el neodimio o el praseodimio son antiferromagnéticos.

Materiales ferrimagnéticos son las conocidas ferritas: compuestos basados en óxidos de hierro, cobalto o níquel. Algunos de estos compuestos aún se usan como imanes permanentes, aunque su coercitividad y su imanación de saturación son algo más bajos que las de los compuestos de tierras raras. Sin embargo, su proceso de fabricación es más sencillo y son más baratas. Debido a su baja conductividad eléctrica, las pérdidas por corrientes inducidas son muy pequeñas, por lo que se emplean en aplicaciones de alta frecuencia.

Ciclos de histéresis y permeabilidad

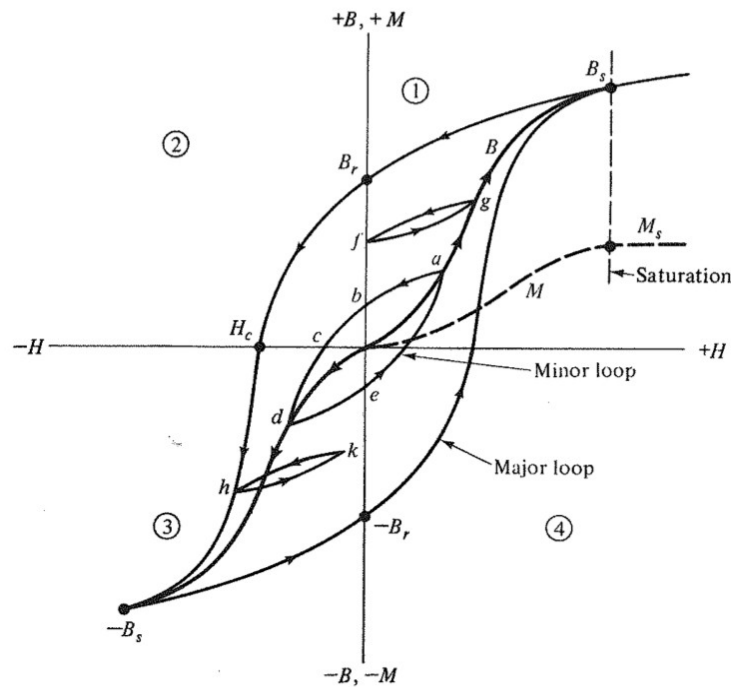


Figura 2.8: Ciclo de histéresis. De la (Ref. 9).

Una substancia ferromagnética exhibe un comportamiento magnético, a una temperatura dada, como el que se ilustra en la Fig. 2.8. Bajo la aplicación de un campo magnético externo, el espécimen se imana (adquiere una imanación M) hasta alcanzar un valor de saturación magnética M_s . La inducción magnética $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$ —en el S.I. de unidades— no se satura, pues es proporcional a H . Partiendo desde el estado desimanado ($H = 0, M = 0$), el espécimen se imana siguiendo la curva de inducción B , que no es lineal. Para valores del campo aplicado suficientemente pequeños, el comportamiento es prácticamente reversible, sin apenas histéresis. El pequeño ciclo tiene forma de lanceta, llamada de Rayleigh —de aspecto similar al ciclo menor fg de la Fig. 2.8—. Si llegado al estado a , se retira el campo aplicado, el material queda en un estado b en el que retiene cierta imanación. Para desimanarlo, es necesario aplicar campo H en sentido contrario hasta alcanzar el estado c de imanación nula. Este estado de imanación nula corresponde al valor macroscópico o promedio de la imanación y no es el mismo que el estado desimanado inicial. La configuración microscópica de la imanación en los estados desimanados inicial y c es diferente, aunque el valor promedio de ésta sea en ambos casos nulo. Si se sigue aplicando más campo en sentido inverso, el espécimen alcanza el estado d , equivalente, pero en sentido inverso, al estado a .

Al retirar este campo, se alcanza el estado *e*, equivalente al *b*. Y si se aplica campo en el sentido inicial, se vuelve a pasar por el estado *a*. La curva de primera imanación es la que pasa por los estados *a* y *g*. Si, alcanzada la saturación magnética, se retira el campo aplicado, el material queda con una imanación remanente M_r ($B_r = \mu_0 M_r$). El llamado campo coercitivo H_c es el necesario para desimantar el material que previamente se ha imanado a saturación. El ciclo de histéresis (*major loop*) corresponde a imanar a saturación el espécimen. Los ciclos menores (*minor loop*), como el *abcdea* y el *fg*, dan información del comportamiento magnético del material, pero de ellos no se obtienen los valores de remanencia B_r o de campo coercitivo H_c .

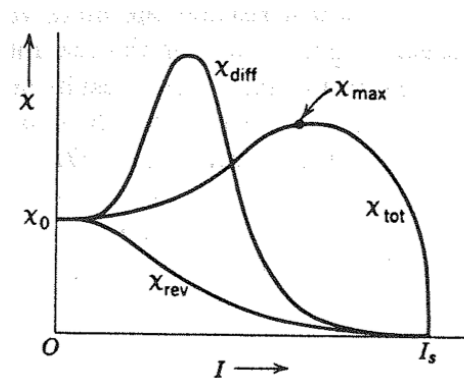


Figura 2.9: Dependencia de la susceptibilidad con el estado magnético (la imanación $I = \mu_0 M$) de la substancia, a temperatura constante. De la (Ref. 8).

Para un medio magnético no lineal, la susceptibilidad χ —o bien la permeabilidad (relativa) μ_r — dependen del estado magnético en el que esté la substancia. La Fig. 2.9 ilustra, de manera genérica, la evolución de la susceptibilidad $\chi = M/H$ con el estado magnético. χ_0 es el valor inicial de ésta. La susceptibilidad diferencial es $\chi_{diff} = dM/dH$. La susceptibilidad reversible es la pendiente M/H de los ciclos menores, reversibles, como el *fg* de la Fig. 2.8. La susceptibilidad total χ_{tot} es el cociente M/H de la curva de primera imanación (la pendiente de la línea que conecta el origen con cada valor de imanación a lo largo de la curva de primera imanación).

Sistema de unidades en el magnetismo:

		S.I.	C.G.S.	
	<i>Símbolo</i>	$B = \mu_0 (H + M)$	$B = H + 4\pi M$	<i>Equivalencia</i>
<i>Inducción</i>	B	tesla, T	gauss, G	$1T = 10^4 G$
<i>Campo magnético</i>	H	A/m	oersted, Oe	$1A/m = 4\pi \cdot 10^{-3} Oe$
<i>Imanación</i>	M	A/m	emu/cm ³ ($\equiv Oe$)	$1A/m = 10^{-3} emu/cm^3$
<i>Momento magnético</i>	m	Am ² ($\equiv J/T$)	emu ($\equiv erg/G$)	$1Am^2 = 10^3 emu$
<i>Polarización magnética</i>	J ó I ($\mu_0 M$)	T	G	$1T = (10^4/4\pi) G$
<i>Susceptibilidad</i>	χ	$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$ adimensional	$\mu = 1 + 4\pi\chi$ (emu/cm ³ /Oe $\equiv adim$)	1 (SI) equivale a $\frac{1}{4\pi}$ (CGS)
<i>Permeabilidad</i>	$\mu_r = \mu/\mu_0$	adimensional $\mu_r = 1 + \chi$	(G/Oe $\equiv adim$) $\mu \equiv \mu_r = 1 + 4\pi\chi$	

2.2.2. Fuerza electromotriz inducida

La ley de Faraday de la inducción establece que la fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la variación con respecto al tiempo del flujo magnético a través del circuito:

$$\varepsilon = -\frac{\partial \phi_m}{\partial t}$$

Supongamos una espira de radio r y un dipolo magnético situado a una distancia x del centro de ésta:

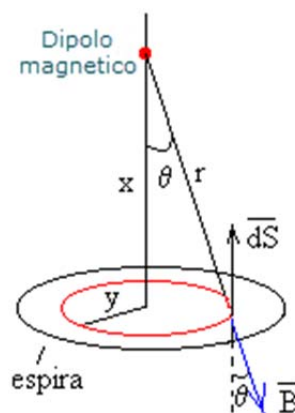


Fig. 2.10

La fem sería:

$$\varepsilon = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{B} d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}$$

Donde \mathbf{B} es el campo magnético creado por el dipolo y \mathbf{A} el potencial magnético vector.

Resulta más sencillo resolver el problema utilizando el potencial magnético vector ya que por el teorema de Stokes,

$$\iint \nabla \times \mathbf{A} d\mathbf{S} = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}$$

Y el potencial magnético vector creado por el dipolo es:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} M \cdot V \cdot \frac{R}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Se puede observar cómo para un R dado, el potencial vector alcanzaría un máximo para una x concreta. Se tiene que el máximo está en:

$$R = \sqrt{2}x$$

Por superposición de dipolos y de espiras se puede modelizar el problema del alternador.

Capítulo 3

Descripción del proyecto

Para el presente trabajo nos hemos basado en el alternador de imanes permanentes de flujo axial, por tratarse de un modelo fácil de reproducir y que ofrece buenos resultados. Este alternador consta básicamente de un estátor compuesto de varias bobinas y de dos rotores de imanes que al girar inducen una fuerza electromotriz en estas bobinas. El motivo de que giren los imanes y no las bobinas es evitar las escobillas.

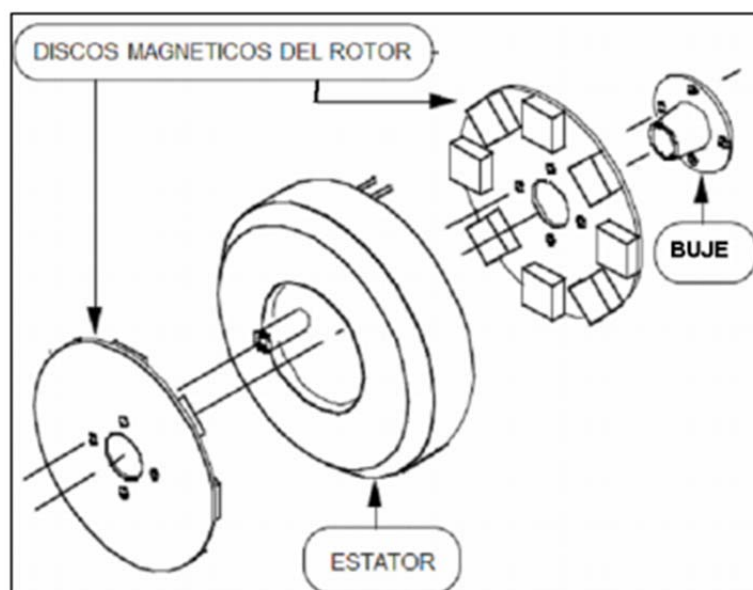


Fig. 3.1

Se ha observado que en todos los modelos que se fabrican de este tipo, se utilizan bobinas huecas. Esto nos ha hecho preguntarnos si utilizando un núcleo de una permeabilidad magnética mayor que la del aire (hierro) podríamos obtener unas fuerzas electromotrices inducidas mayores.

Utilizando un medio magnético muy blando éste podría saturarse en presencia de un campo magnético no muy alto y alcanzar una magnetización muy superior. Es importante tener en cuenta también la geometría del núcleo debido a la influencia de ésta en el campo desimanador.

En las figuras 3.2 y 3.3 se puede observar la influencia de la geometría en el campo desimanador. En ellas se representa el campo desimanador para cilindros y elipsoides magnetizados a lo largo de su eje largo en función del cociente entre el eje largo y el corto.

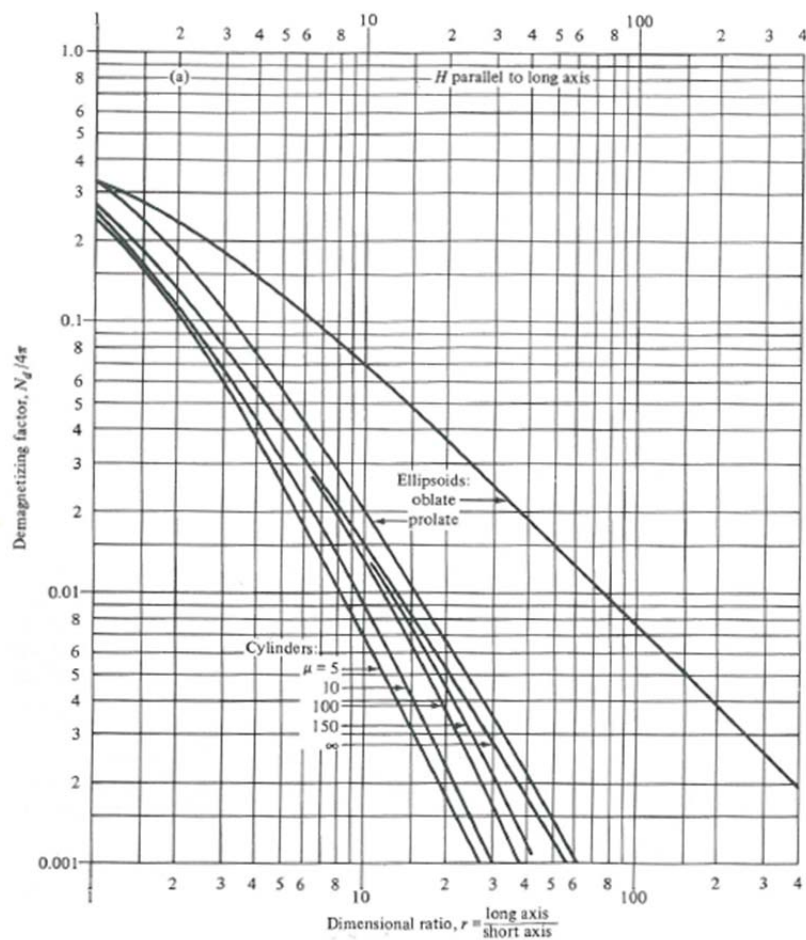


Fig. 3.2

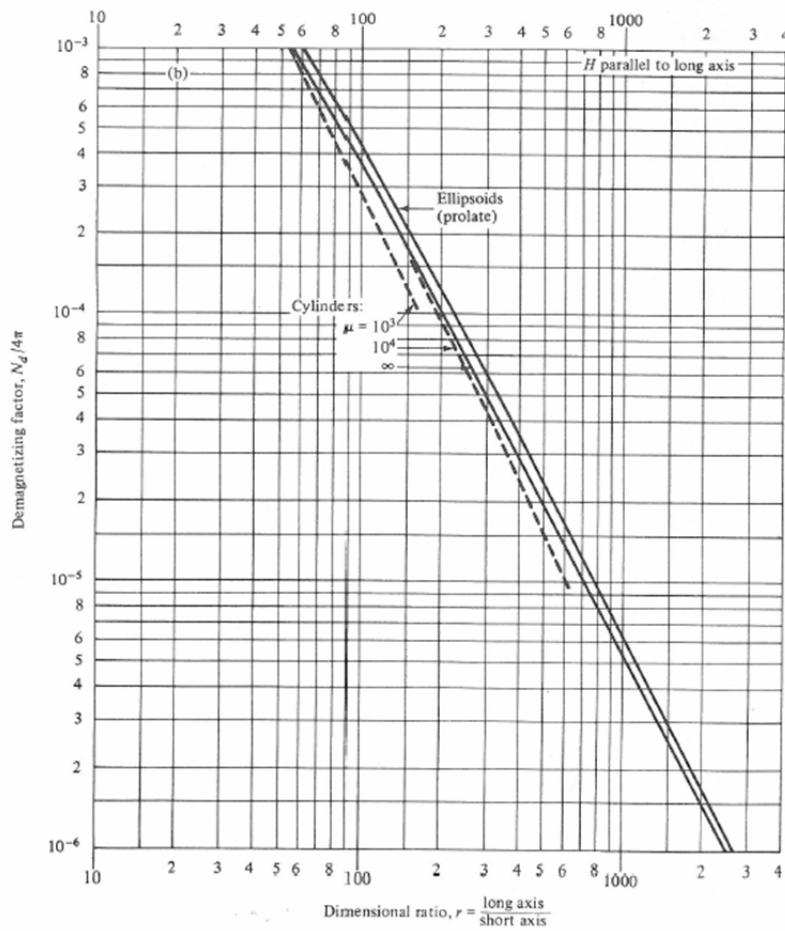


Fig 3.3

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestra el distinto comportamiento magnético de distintos materiales

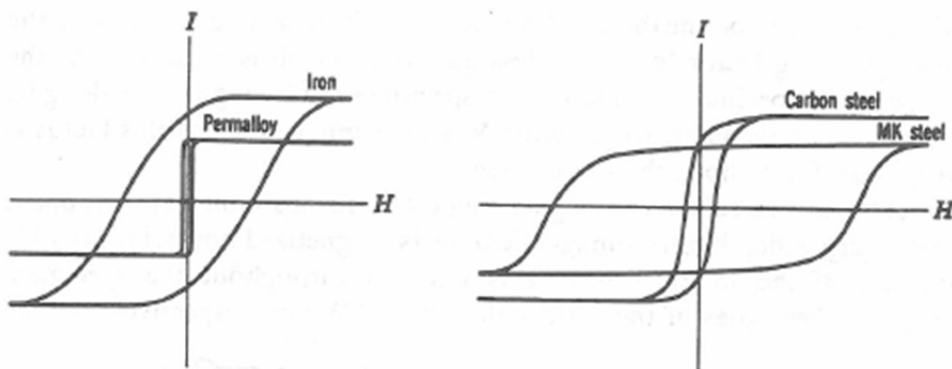


Fig 3.4

Material	I_s Wb/m ²	H_c		$\bar{\mu}_a$	$\bar{\mu}_{max}$
		A/m	Oe		
Mild steel	2.12	143	1.8	120	2,000
Oriented Si-steel	2.00	8	0.1	1,500	40,000
78 Permalloy	1.08	4	0.05	8,000	100,000
Supermalloy	0.79	0.16	0.002	100,000	1,000,000
Cobalt	1.79	797	10	70	250
Nickel	0.61	56	0.7	110	600
Alnico V	$I_r = 1.31$	50,900	640	—	—

Fig 3.5

En principio, parece evidente que a igual velocidad angular del rotor la fuerza electromotriz inducida sería mayor, pero hay que tener en cuenta que los pares generados por la atracción entre los imanes y los núcleos de hierro serían mucho mayores y en consecuencia la potencia que nos debiera dar las aspas también debiera de ser mucho mayor.

El estudio se va a centrar en la optimización de este tipo de alternador utilizando esta posibilidad. Para ello construiremos un prototipo de pruebas en el que se harán distintos ensayos.

3.1. El prototipo de pruebas

Para la realización de los ensayos se ha construido un prototipo experimental que consta de dos rotores de imanes y un estátor de bobinas. A continuación se explican detalladamente los componentes del mismo.

3.1.1. La estructura

La estructura se compone de dos discos de chapa negra sobre los que se asientan dos rodamientos UCF-200, que se ilustran en la Fig. 3.6, separados por unas varillas roscadas de acero M12. El conjunto se asienta sobre unas patas de PVC.



Fig 3.6

En las figuras 3.7 y 3.8 se observa el conjunto montado. Se puede ver cómo los rotores y el estator se asientan sobre esta estructura.

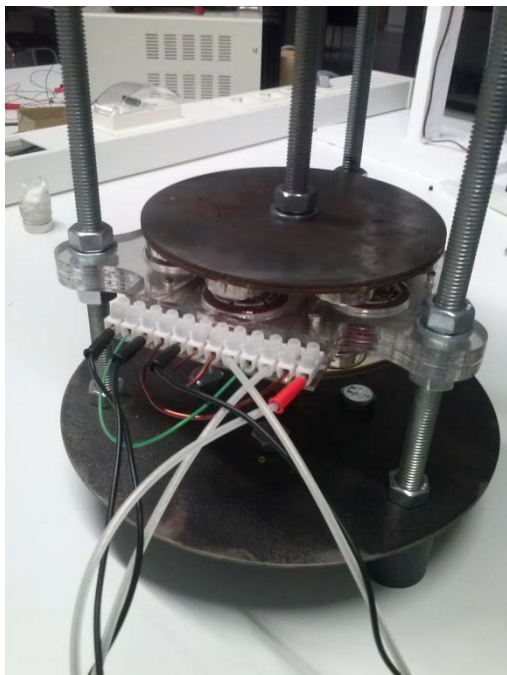


Fig 3.7



Fig 3.8

Tanto las chapas de la estructura como las de los soportes fueron cortadas por corte por agua. En la 3.9 podemos ver el monitor de la máquina de corte mostrando el patrón de corte. En la Figura 3.9.1 se observa la máquina de corte trabajando.



Fig. 3.9



Fig. 3.9.1

3.1.2. Los rotores

Los rotores están compuestos por dos chapas material llamado chapa negra² sobre los que se asientan 8 imanes.

ELEMENTO		COMPOSICION QUIMICA DE LA ALEACION (°/o) MAXIMOS			
		TIPO D	TIPO L	TIPO MC	TIPO MR
Carbono	C	0,12	0,13	0,13	0,13
Manganeso	Mn	0,60	0,60	0,70	0,60
Fósforo	P	0,020	0,015	0,15	0,020
Azufre	S	0,05	0,05	0,05	0,05
Silicio	Si	0,020	0,010	0,010	0,010
Cobre	Cu	0,20	0,060	0,20	0,20
Níquel	Ni	—	0,04	—	—
Cromo	Cr	—	0,06	—	—
Molibdeno	Mo	—	0,05	—	—
Otros elementos residuales		—	0,02	—	—

Fig. 3.10

Debido a la enorme fuerza de los imanes utilizados, éstos resultan muy difícil de colocar, motivo por el cual, hemos realizado una plantilla de PVC expandido que nos ayuden a colocarlos. Esta plantilla que se muestra en la fig. 3.11 se asentará sobre los discos de chapa negra.



Fig. 3.11

² Chapa negra es el nombre convencional dado a uno de los aceros laminados más económicos del mercado, cuya composición química aproximada se muestra en la (Fig. 3.10) extraída del Anexo 2



Fig. 3.12

En la fig. 3.12 se muestra uno de los rotores completo. Se puede observar cómo los imanes están colocados alternativamente con polaridades inversas. De esta manera se consigue la máxima variación de flujo en las bobinas, que es lo que nos interesa.

En realidad, todo el conjunto se ha diseñado en función de los imanes elegidos, ya que ellos son la parte más cara del mismo.

Características de los imanes:

Los imanes elegidos son unos imanes de neodimio hierro boro en forma de disco de 30 mm de diámetro y 10 mm de ancho proporcionados por la casa “Supermagnete”, porque hemos creído que se ajustaban muy bien a nuestras necesidades a un precio razonable. La dirección de la imanación es axial.

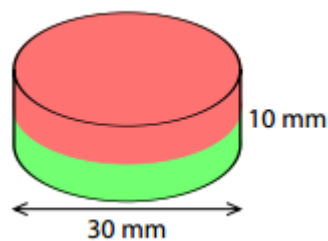


Fig. 3.12

El fabricante nos proporciona un diagrama de la fuerza magnética con respecto al “gap” de aire entre un imán y un disco de hierro que se muestra en la Fig. 3.13:

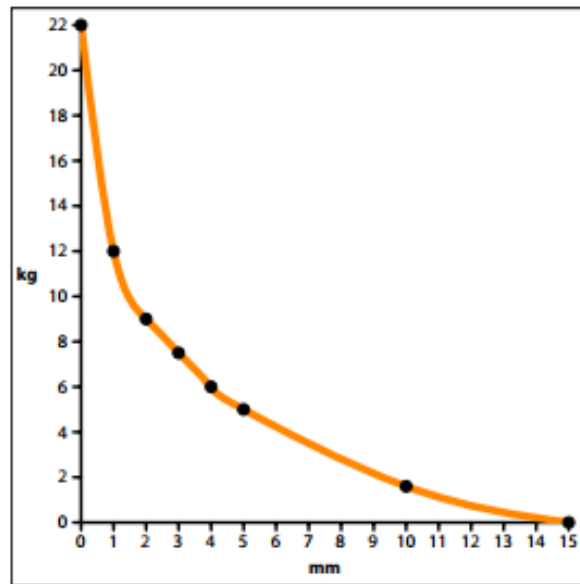
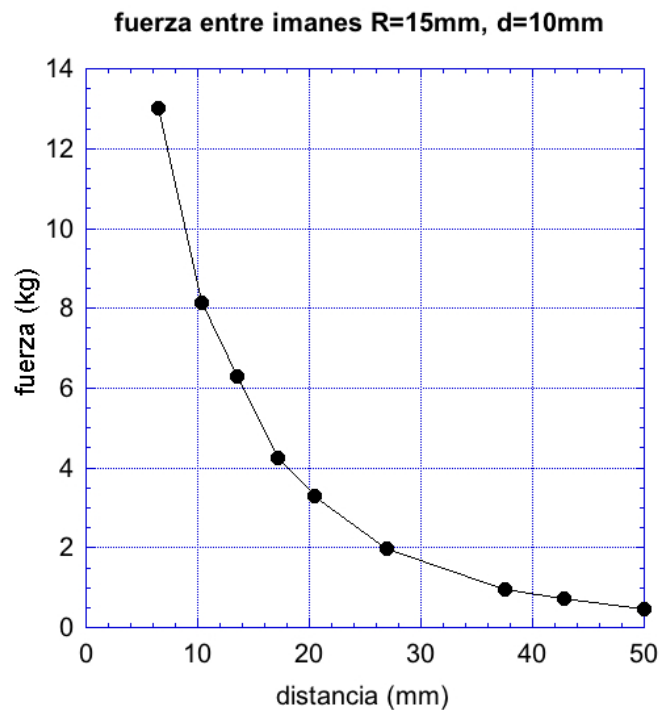


Fig. 3.13

Por nuestra parte, tomamos datos relativos a la fuerza entre dos imanes con distintas distancias de separación utilizando una báscula sobre la que se colocó una viga de hierro a la que estaba adherido uno de los imanes. La atracción del segundo imán produciría una diferencia de pesos que nos indicaba la fuerza atractiva entre estos dos. La gráfica obtenida mediante éste método se ilustra en la Fig. 3.14.



3.14



Fig 3.15. Báscula utilizada en la obtención de datos

Así mismo, se realizaron ensayos relativos al campo magnético existente entre dos imanes en función de la distancia entre los mismos obteniendo los siguientes resultados en la fig. 3.16:

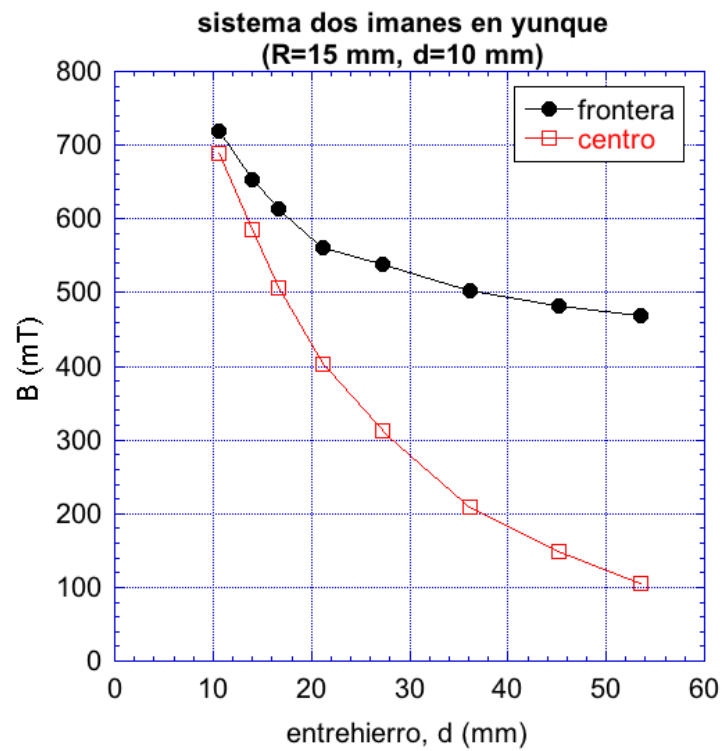


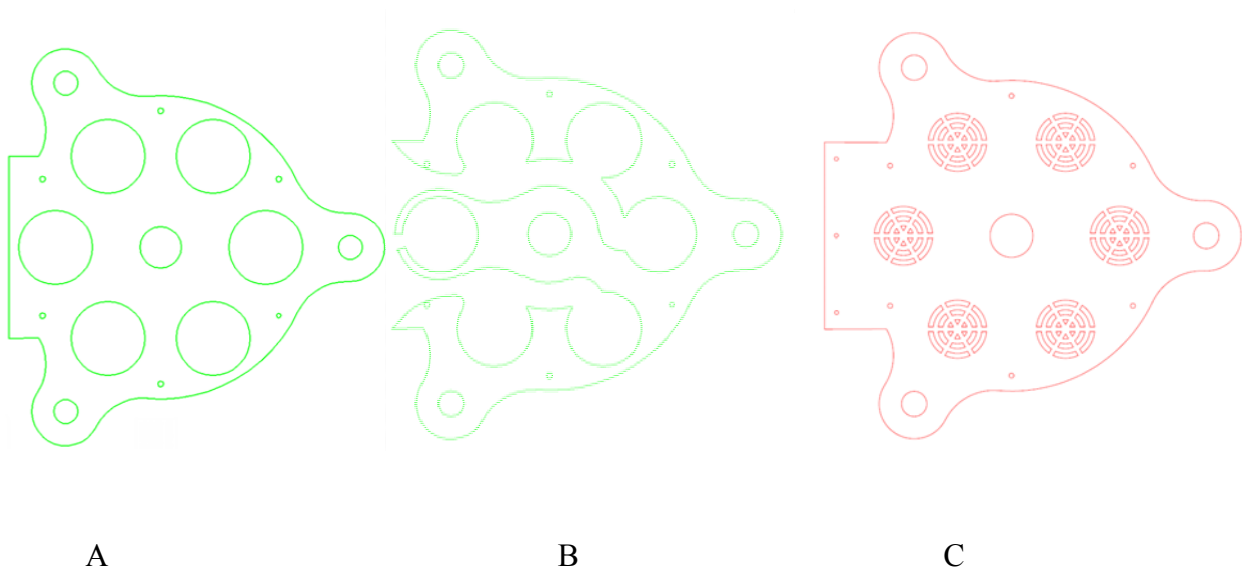
Fig. 3.16



Fig. 3.17. Teslámetro PHYWE utilizado en la obtención de datos

3.1.3. El estátor

El estátor es un disco de varias capas de metacrilato dentro de las cuales se alojan las bobinas. Dentro de éstas existe la posibilidad de colocar o extraer los núcleos anteriormente mencionados. Éste se ha fabricado con 5 capas de metacrilato. En las siguientes imágenes se muestran las plantillas con las que se ha fabricado el disco. El interior del disco, en el que están alojadas las bobinas está compuesto por un sándwich A-A-B-A-A. Los huecos que se observan en la imagen b son para que pasen los cables que irán a la regleta de empalmes. En la imagen c se muestra la plantilla de las tapas superior e inferior que cierran el conjunto (C-A-A-B-A-A-C).



El resultado final se puede ver en la fig. 3.18:



Fig. 3.18

La fig 3.19 nos muestra el disco sin la tapa superior:



Fig. 3.19

3.1.3.1. Las bobinas

Las bobinas tienen unas dimensiones de 37 mm de diámetro y 10 mm de espesor y se han fabricado con hilo esmaltado de cobre de 0,6 mm de diámetro (HCE 060). Constan de 390 ± 20 espiras y tienen una resistencia de $1,6 \pm 0,1 \Omega$ y una inductancia de $1,6 \pm 0,1 \text{ mH}$. Para el bobinado utilizamos el torno que se muestra en la fig. 3.20 y un carrete bobinador fabricado en este mismo torno compuesto por una varilla roscada de latón, un casquillo de aluminio y dos cilindros de plástico extraíbles. Puede verse en las figs. 3.21. En el proceso, utilizamos la velocidad mínima del torno y una vez completadas la bobinas se fijaron los hilos con cianoacrilato.

Éste mismo torno se usó para fabricar otras piezas como las patas de la estructura y los casquillos de acero que encajan en los rodamientos.



Fig 3.20

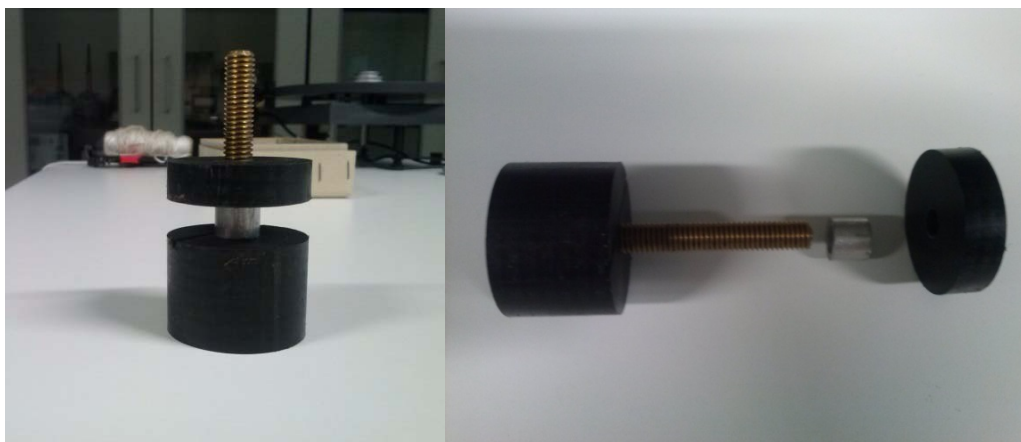


Fig. 3.21

En los discos se han utilizado 8 imanes y el estátor está compuesto de 6 bobinas. Esto es así en una

relación de 4 a 3, es decir, hay un desfase de $1/3$, para generar corriente trifásica con un desfase de 120° ($1/3$ de ciclo) entre fases. El hecho de generar corriente alterna trifásica nos ha parecido interesante ya sea para ser utilizada como tal como para ser rectificada, ya que el rectificado de ésta será mejor.

3.1.3.2. Los núcleos de acero

Para los núcleos se ha utilizado un acero del que disponíamos en taller. Sus propiedades magnéticas han sido determinadas en el laboratorio y se ilustran en la Fig. 3.22.

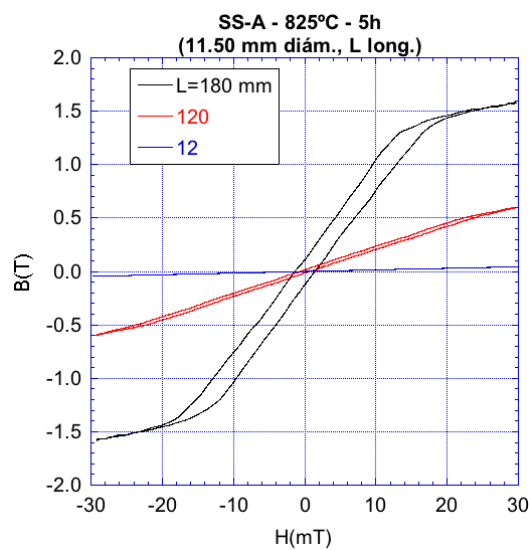


Fig. 3.22

Esta es una imagen de uno de los núcleos. Sus medidas son 10 mm de diámetro y 10-12 mm de altura.



Fig. 3.23

Así pues, se realizaron unos tratamientos térmicos en atmósfera reductora para intentar optimizar en la medida de lo posible este comportamiento magnético, siguiendo instrucciones de la (Ref. 15). En las Figs. 3.24, 3.24' y 3.24'' se muestran los hornos utilizados para tal fin.



Fig. 3.24



Fig. 3.24'



Fig. 3.24''

En ausencia de campo magnético aplicado durante el tratamiento térmico se observa en la Fig. 3.25 que el comportamiento magnético apenas ha variado.

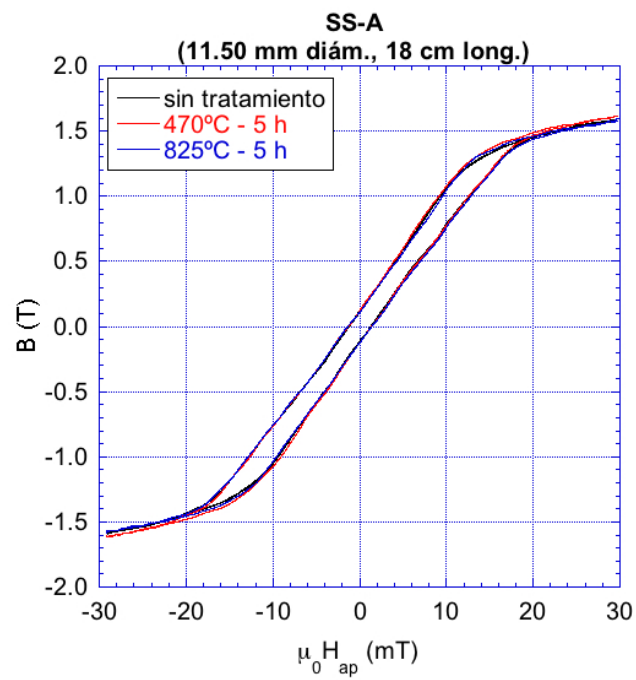


Fig. 3.25

3.2. Los ensayos

Para los ensayos, utilizamos el taladro Makita que se muestra en las figs. 3.26 y 3.26.



Fig. 3.26



Fig. 3.27

Se puede observar que cuenta con un regulador de par, que nos servirá en nuestras pruebas.

3.2.1. Equipos de medición

A continuación se muestran los equipos de medición utilizados. En la fig. 3.28 aparece el osciloscopio de la firma japonesa Yokogawa DL1520 utilizado en todas las mediciones de tensión y frecuencia.



Fig. 3.28

En la Fig. 3.29 aparece el osciloscopio de la firma americana LeCroy WaveRunner 6100A ---que permite muestrear hasta cuatro señales de manera simultánea--- utilizado para la toma de datos de la gráfica que muestra la representación de la señal trifásica. El osciloscopio utilizado normalmente sólo tenía 2 canales mientras que éste nos ha permitido este propósito.

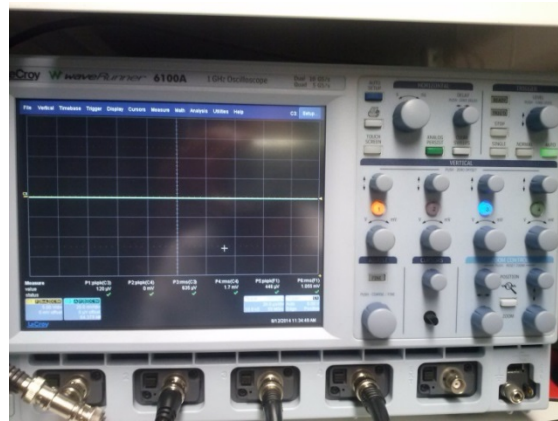


Fig. 29

El multímetro Meterman 37XR (de la firma americana Amprobe) que utilizamos para medir resistencias, impedancias e intensidades viene ilustrado en la fig. 3.30.



Fig. 3.30

3.2.2. Resultados

Así pues, con este prototipo se realizaron diferentes ensayos. La Fig. 3.31 muestra la señal de salida medida con el osciloscopio LeCroy WaveRuner 6100A. Se trata de una señal trifásica de tensión con un desfase de 120° entre cada una de las fases.

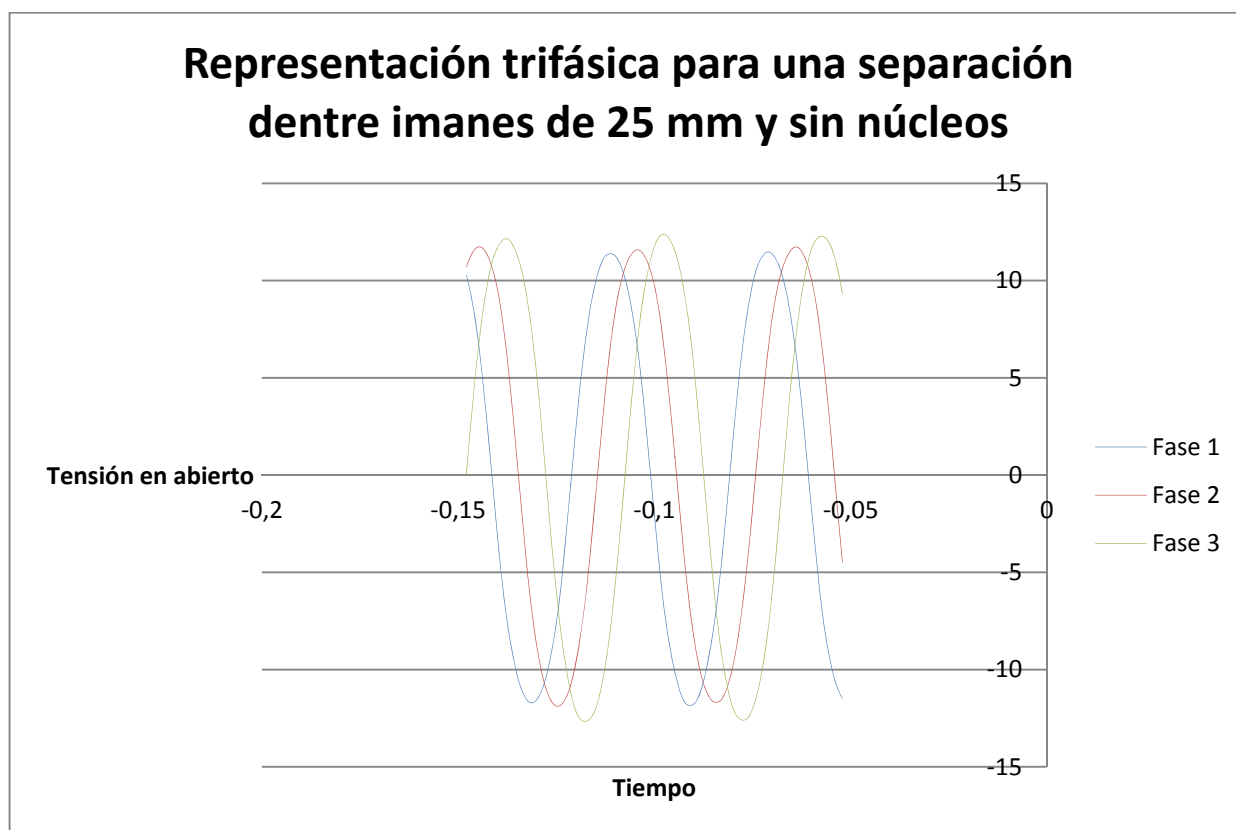


Fig. 3.31

En este caso, las bobinas en fase estaban unidas en serie. La diferencia de amplitudes entre fases se debe a que los bobinados no tienen exactamente el mismo número de espiras, así como a pequeñas variaciones en la distancia de separación entre los imanes y las bobinas.

En general, los ensayos se realizaron con y sin núcleo. En ellos se hizo girar el rotor con el taladro a batería con regulador de par para tener una idea comparativa del par necesario para poner en movimiento el conjunto en diferentes circunstancias. Este taladro dispone de diferentes posiciones del 1 al 12 con las que se puede incrementar el par ejercido, si bien no conocemos los valores de este par ni los incrementos porcentuales de un punto a su inmediato superior. El número de Rev/s lo inferimos a partir de los datos de frecuencia que nos ofrece el osciloscopio.

Se realizan mediciones de tensión en circuito abierto y de intensidad en circuito cerrado. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Ensayos con núcleos de acero:

Distancia de separación entre imanes 25mm

F (rev/s)	T (ms)	V _{pp} (V)	V _{Ef.} (V)	I (A)	Cos ϕ	P (W)	Salta en
0,91	137	4,56	1,51	1,1	1,00	1,66	
1,59	78,8	8,32	2,95	1,97	1,00	5,79	
2,30	54,4	12,56	4,52	2,87	0,99	12,89	
3,03	41,2	16,00	5,82	3,68	0,99	21,17	
4,34	28,8	24,60	8,60	5	0,98	42,01	
5,53	22,6	36,20	10,87	5,9	0,96	61,79	
7,81	16	45,00	15,96	7,7	0,93	114,39	

		P _{necesaria}	P _{gen} /P _{nec}				
2,19	57	27,54	0,44	2,495		12,02	2
2,78	45	52,33	0,35	3,2		18,55	3
3,21	39	80,51	0,30	3,7		23,92	4
4,63	27	145,37	0,08	4,765		45,49	5

Tabla 1

Distancia de separación entre imanes 35 mm

F (rev/s)	T (ms)	V _{pp} (V)	V _{Ef.} (V)	I (A)	Cos ϕ	P (W)	Salta en
1,15	109	3,48	1,16	0,86	1,00	1,00	
2,20	56,8	7,52	2,68	1,62	0,99	4,32	
3,21	39	10,80	3,80	2,42	0,99	9,08	
4,11	30,4	14,20	4,90	3,03	0,98	14,54	
5,46	22,9	18,80	6,55	3,82	0,96	24,13	
9,12	13,7	30,80	11,14	5,6	0,91	56,70	

		P _{necesaria}	P _{gen} /P _{nec}				
5,43	23	34,13	0,68	3,6		23,28	1
6,25	20	78,50	0,38	4,1		29,50	2
6,25	20	117,75	0,25	4,1		29,50	3
6,25	20	157,00	0,19	4		29,50	4

Tabla 2

Distancia de separación entre imanes 45 mm

F (rev/s)	T (ms)	V _{pp} (V)	V _{Ef.} (V)	I (A)	Cos ϕ	P (W)	Salta en
1,29	97,2	2,64	0,91	0,56	1,00	0,51	
2,44	51,2	4,96	1,77	1,1	0,99	1,93	
4,03	31	9,04	3,05	1,81	0,98	5,41	
5,04	24,8	11,60	3,87	2,2	0,97	8,25	
6,51	19,2	14,20	4,98	2,71	0,95	12,83	
7,96	15,7	17,00	5,88	3,08	0,93	16,81	

		P _{necesaria}	P _{gen} /P _{nec}				
7,81	16	49,06	0,34	3		16,45	1

Tabla 3

Sin los núcleos de acero:

Distancia de separación entre imanes 25 mm

F (rev/s)	T (ms)	V _{pp} (V)	V _{Ef.} (V)	I (A)	Cos ϕ	P (W)	Salta en
1,43	87,6	5,20	1,88	1,22	1,00	2,29	
2,22	56,4	8,48	3,02	1,9	0,99	5,70	
3,21	39	12,32	4,46	2,7	0,99	11,89	
4,18	29,9	16,80	6,23	3,5	0,98	21,34	
5,23	23,9	20,00	7,22	4,2	0,97	29,33	
7,06	17,7	27,60	10,36	5,26	0,94	51,35	
9,92	12,6	38,80	13,84	7,2	0,89	89,18	

		P _{necesaria}	P _{gen} /P _{nec}				
4,17	30	26,17	0,78	3,2		20,43	1
5,68	22	71,36	0,49	4,2		34,73	2
6,94	18	130,83	0,37	5,27		48,75	3

Tabla 4

A continuación se expresan los resultados gráficamente:

Tensión en vacío según frecuencia y distancia entre imanes

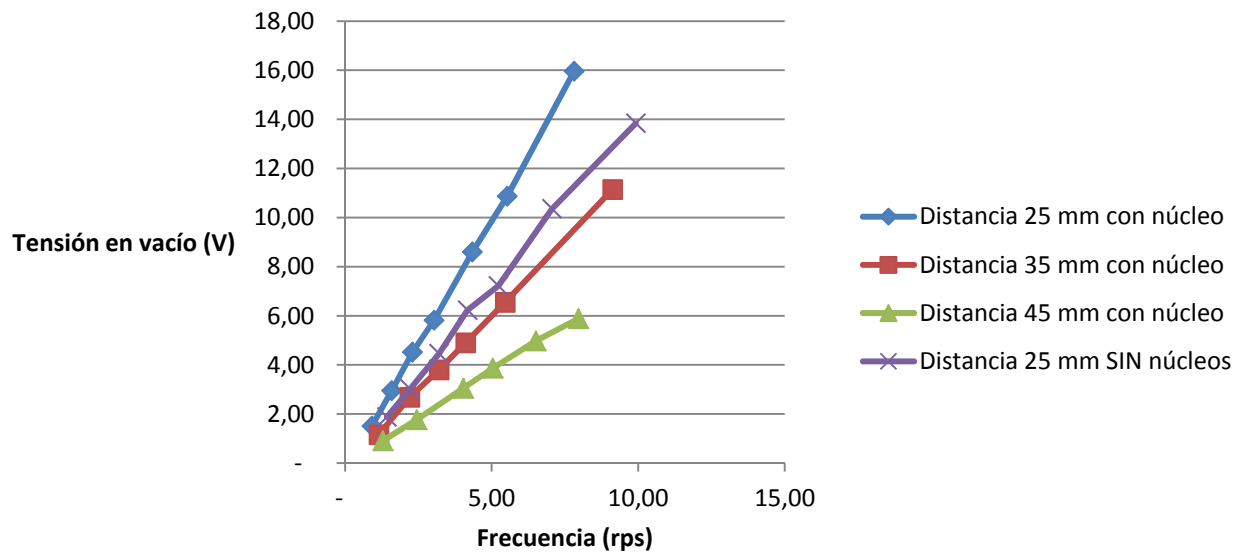


Fig. 3.32

Intensidad en cortocircuito según frecuencia y distancia entre imanes

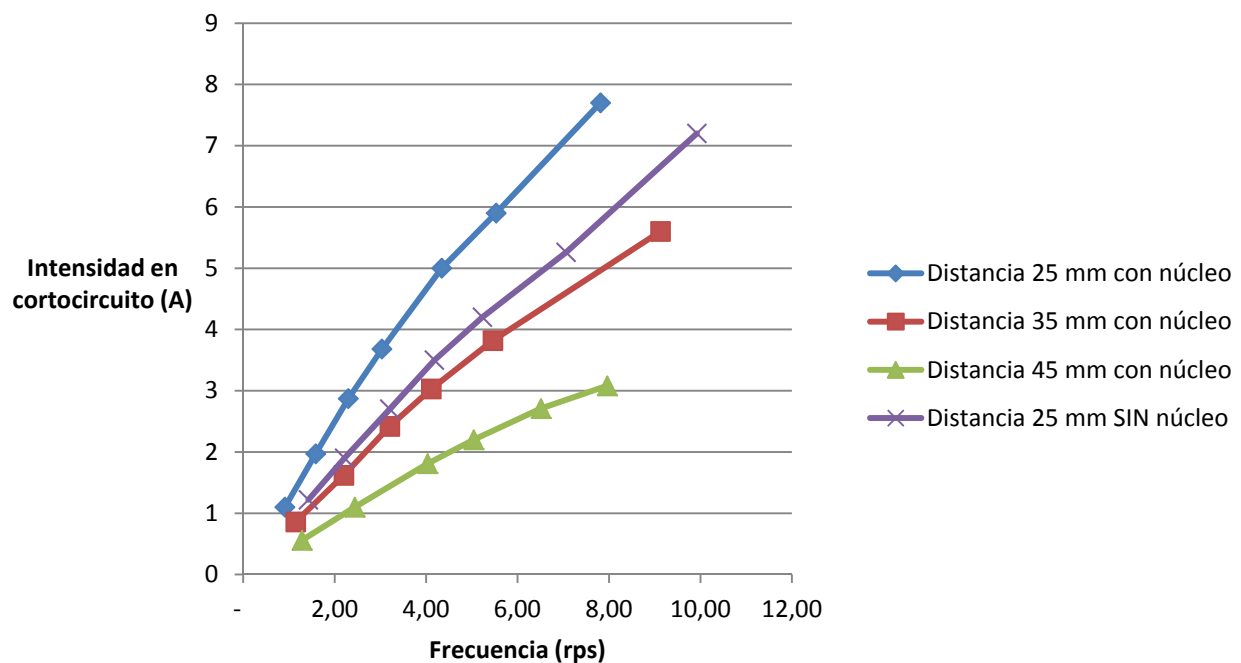


Fig. 33

Potencia máxima según frecuencia y distancia entre imanes

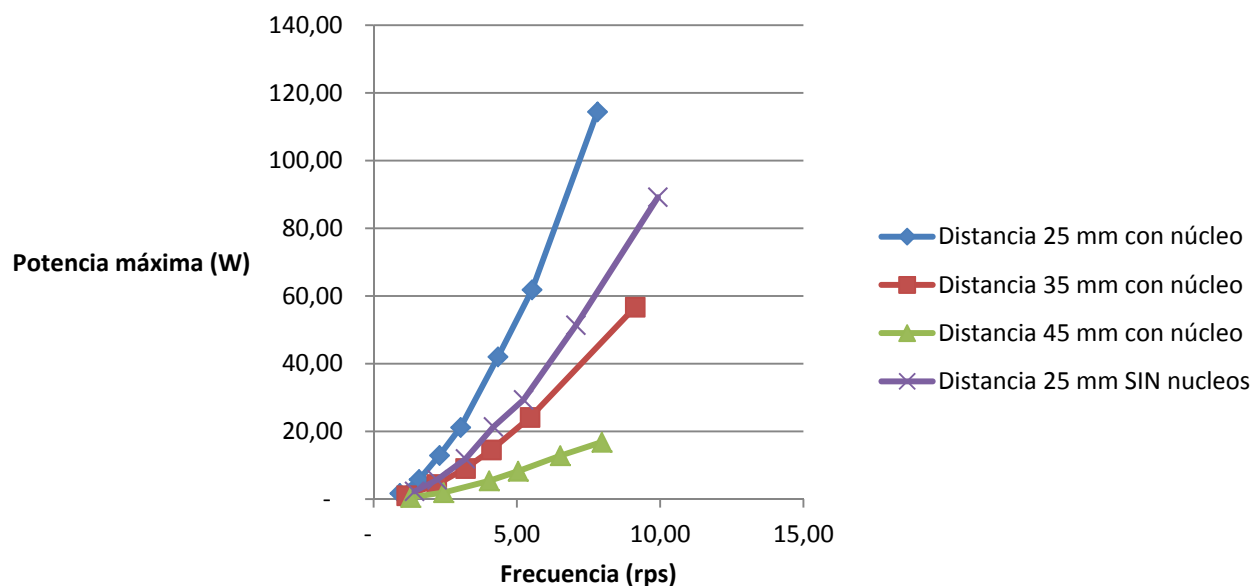


Fig. 34

O lo que es lo mismo visto en escala logarítmica:

Potencia máxima según frecuencia y distancia entre imanes

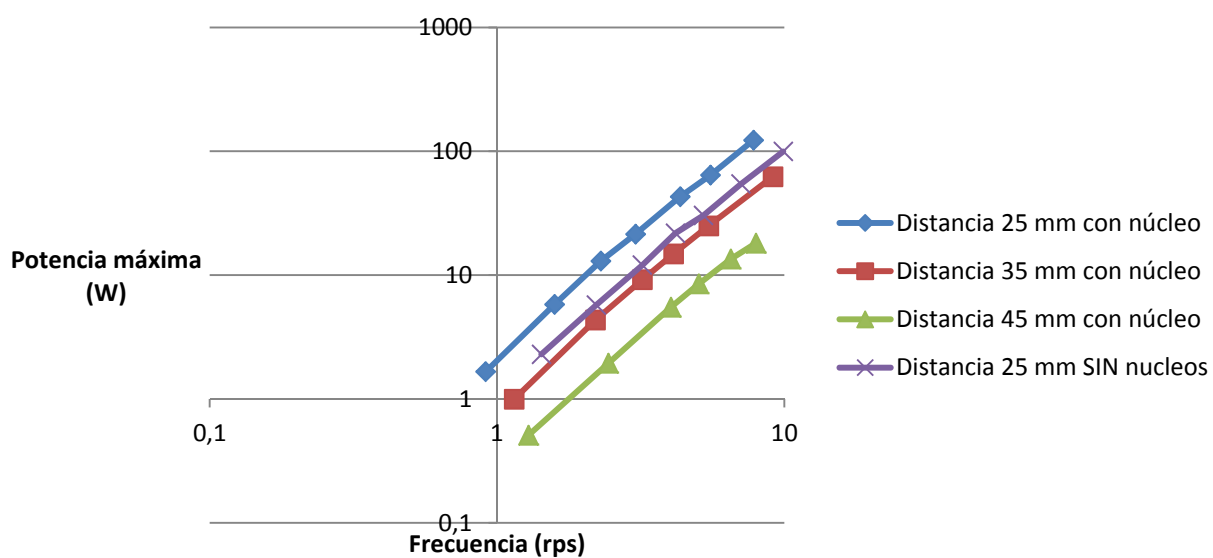


Fig. 35

Se puede observar que para iguales velocidades y distancias, con núcleos obtenemos potencias mayores pero también es cierto que el par necesario para poner el sistema en movimiento en consecuencia la potencia necesaria también son mayores.

$$P_{necesaria} = M \cdot \omega$$

Así pues, hay que comparar la potencia generada con la potencia que el viento ejerce sobre las aspas para calcular cuál de los dos sistemas tendría un mejor rendimiento.

Las líneas de tendencia de las curvas de potencia responden a las siguientes ecuaciones:

En el caso de las bobinas con núcleos y una separación de 25 mm entre imanes:

$$P_{necesaria} = 1,4f^2 + 4,25f - 3,97$$

En el caso de las bobinas con núcleos y una separación de 35 mm entre imanes:

$$P_{necesaria} = 0,46f^2 + 2,26f - 2,6$$

En el caso de las bobinas con núcleos y una separación de 45 mm entre imanes:

$$P_{necesaria} = 0,14f^2 + 1,21f - 1,55$$

En el caso de las bobinas SIN núcleos y una separación de 25 mm entre imanes:

$$P_{necesaria} = 0,6f^2 + 3,54f - 4,7$$

Así pues, a partir de las funciones de las líneas de tendencia es cómo se han calculado las potencias que se generan en cada uno de los casos que salta el limitador de par del taladro utilizado.

Se observa en las tablas que también se ha calculado la potencia necesaria para poner el sistema en movimiento en las condiciones que se indican, aunque estos valores vienen sin unidades ya que no

se conoce las unidades del par ejercido por el taladro en cada una de las distintas posiciones. Tampoco se conoce el incremento porcentual entre un punto y su inmediato mayor, por lo que estos valores servirán sólo comparativamente entre dos situaciones que salten en el mismo punto.

A continuación, se puede observar en las Figs. 36 y 37 cómo la relación de potencias generada y necesaria para la situación de las bobinas sin núcleos y distancia entre imanes 25 mm es la más ventajosa de todas, pero no hay demasiada diferencia con respecto a las situaciones de los discos con núcleos y distancia entre imanes de 25 y 35 mm.

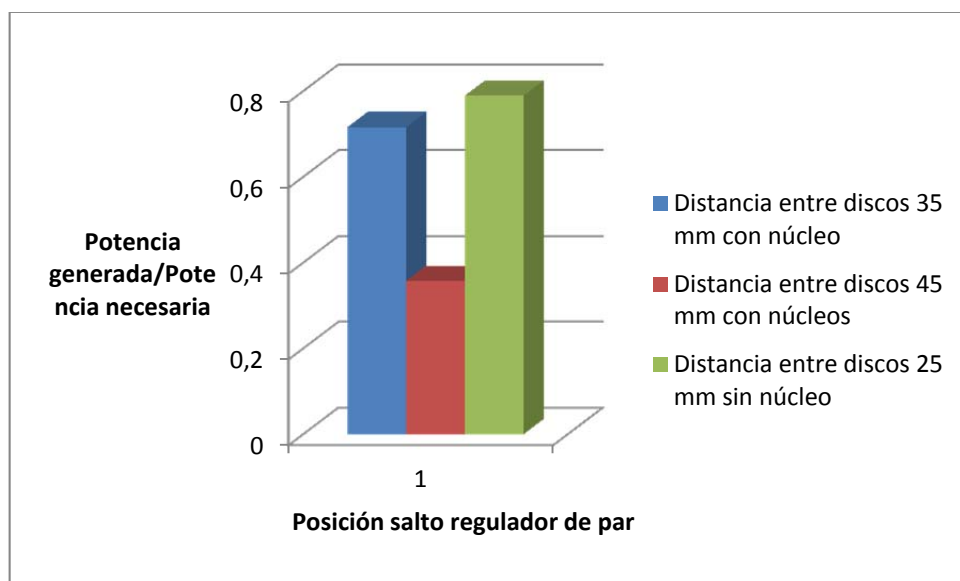


Fig. 36

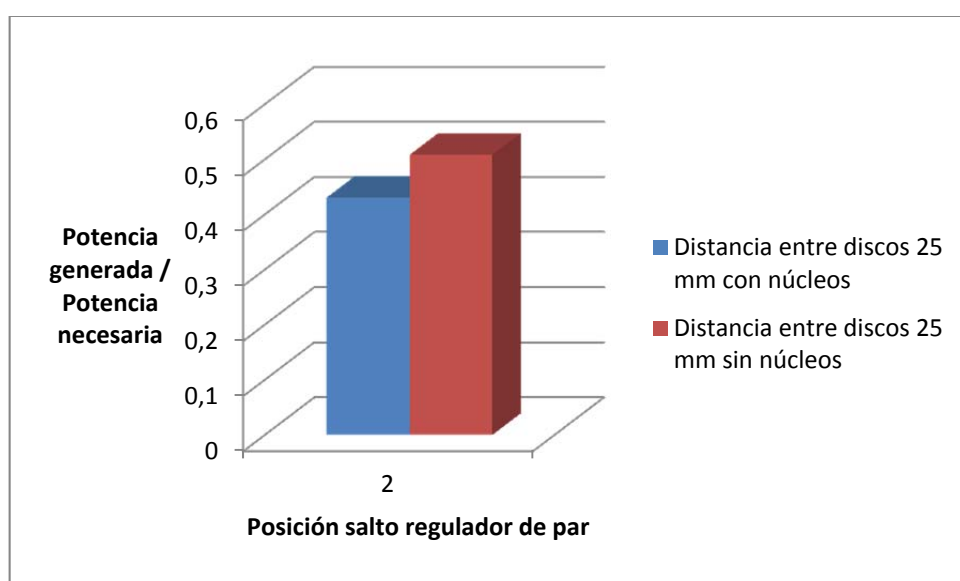


Fig. 37

3.3. Conclusiones

A continuación se va a determinar el tipo, número y tamaño de las aspas más adecuado. En principio, nos interesan velocidades de giro lo más altas posibles y sabemos que a menor número de aspas mayor es la velocidad angular. Esto nos podría sugerir utilizar una turbina bipala, sin embargo, también sabemos que la velocidad de arranque es mayor cuanto menor es el número de palas. Teniendo esto en cuenta, vamos a elegir una turbina tripala, para tener así altas velocidades de viento sin comprometer demasiado la velocidad de arranque. Para la mayoría de turbinas tripala ésta es entre 3 y 4 m/s.

Según la figura 2.1.4, para las turbinas tripala corresponde un valor de λ de entre 4 y 5,5, si bien los modelos habituales de hoy en día tienen un λ de 6. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea λ mayor será la velocidad de giro, ya que:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{viento}}$$

Como lo que nos interesa es también tener altas velocidades, tomaremos una turbina con $\lambda=6$. Para este λ tendríamos un $C_p=0,4$

El tamaño de las aspas se determinará en función de las condiciones del alternador. Aquí se va a determinar para el caso en el que las bobinas se encuentran sin núcleos y los discos de imanes a 25 mm de distancia entre sí.

Así, tenemos que:

$$\omega = \frac{\lambda V_{viento}}{R}$$

La mayoría de los aerogeneradores comerciales toman una velocidad de viento nominal de 9 m/s. Es el valor que vamos a tomar nosotros también.

Así, tomamos valores de R entre 0,7 y 1,3 m obteniendo distintas velocidades angulares. Como conocemos la línea tendencia de la potencia generada en función de la velocidad angular, obtenemos así los valores de potencia correspondientes.

Ahora bien, hay que tener en cuenta que la potencia generada nunca podría ser mayor que la potencia proporcionada por las aspas. Recordemos que:

$$P_c = C_p \frac{1}{2} \rho A V_{viento}^3$$

Tomando densidades del aire correspondientes a 25° de temperatura de manera que $\rho_{aire}=0,185$ y tomando $C_p=0,4$ se obtienen los distintos valores de potencia del viento en función del radio de las aspas.

La siguiente gráfica muestra las potencias generada y disponible en función del radio de las aspas. En ella se puede observar que, para este caso, el radio óptimo de las aspas, suponiendo que no hubiera en el alternador pérdidas mecánicas, por efecto Joule o de otro tipo, es de casi 1 m. Si el radio fuera superior, la potencia disponible sería mucho más de la que se consigue transformar y en el caso de ser inferior, la potencia disponible sería menor de la generada según nuestro modelo, lo cual no sería posible.

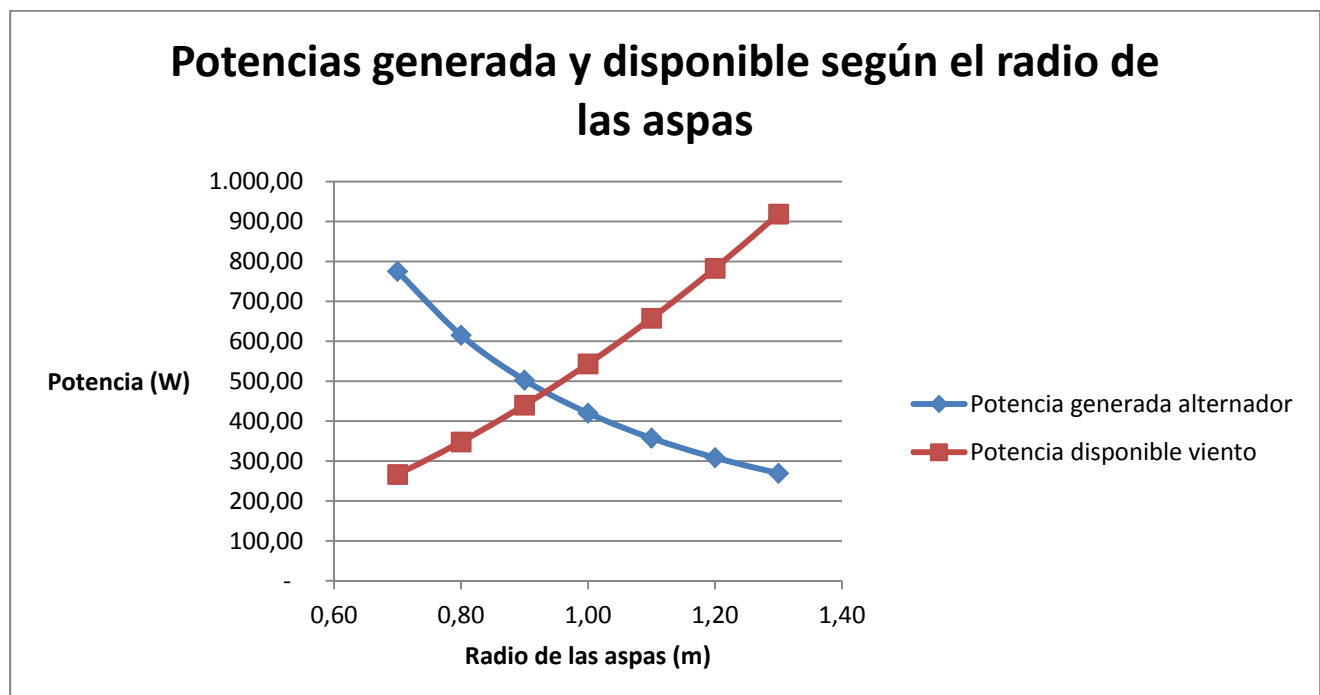


Fig. 3.38

Así pues, tenemos que para un radio de aspas de 1 m, la potencia generada por el alternador a una velocidad de viento nominal de 9 m/s sería unos nada despreciables 420 W. A continuación se muestra la tabla de potencias según la velocidad del viento para la configuración con aspas de 1 m de radio.

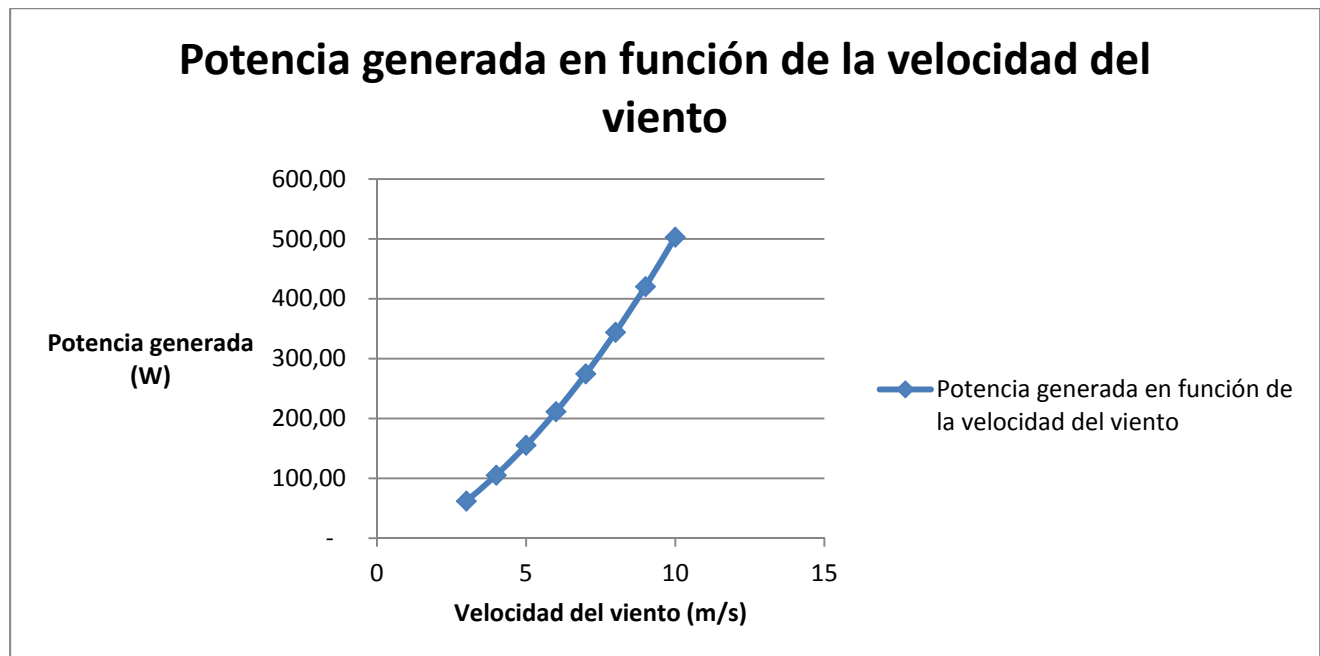


Fig. 3.39

3.3.1. Posibles diseños alternativos y mejoras

Hay que tener en cuenta que el disco de bobinas utilizado estaba diseñado para ser usado experimentalmente, de manera que se pudieran extraer las bobinas, los núcleos, cambiar las configuraciones, etc...

Para este caso concreto de la configuración sin núcleos se podría diseñar el disco ya para su uso de manera que la distancia entre imanes fuera no ya 25 mm sino 15 mm o incluso menor. Esto haría que la potencia generada aumentara considerablemente, ya que así lo haría la variación de flujo porque el campo creado por los imanes sería mucho mayor, tal como vemos en la imagen siguiente a la que ya nos referimos previamente:

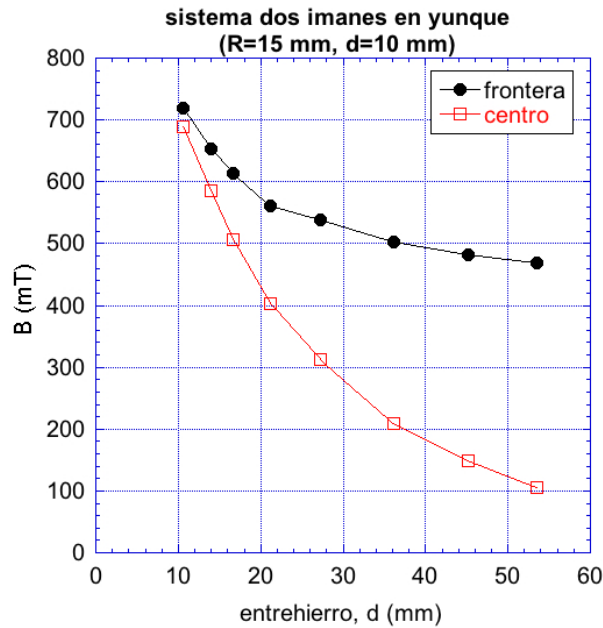


Fig. 3.40

Una variante de este diseño para el caso de las bobinas sin núcleo, sería la utilización de más discos de bobinas y de imanes en el mismo alternador colocados a lo largo de su eje. A partir de este diseño podríamos añadir un disco de bobinas por cada nuevo disco de imanes, multiplicando así la potencia. En estos casos, habría que redimensionar el tamaño de las aspas.

En cuanto a los experimentos que se hicieron con núcleos, recordemos que se dieron configuraciones en donde el cociente entre la potencia generada y la potencia necesaria era comparable al de los experimentos sin núcleos, a pesar de haber utilizado un material cuyo comportamiento magnético no era el idóneo. Esto nos hace pensar que con los núcleos adecuados se podrían obtener mejores resultados, obteniéndose una ventaja con respecto a la configuración sin núcleos. En este caso, el campo magnético para llevar a saturación los núcleos no sería demasiado alto, de manera que el par necesario para poner en movimiento el sistema no sería tan elevado como en el caso de los núcleos de hierro. Además, el campo alcanzado en saturación podría ser mayor.

Diseño con núcleos y distancia entre imanes y bobinas regulable en función de la velocidad.

Este diseño consiste en un sistema que permite acercar o alejar el disco de imanes a las bobinas en función de la velocidad por medio de un regulador de Watt. Este diseño es el que se ilustra en la siguiente figura:

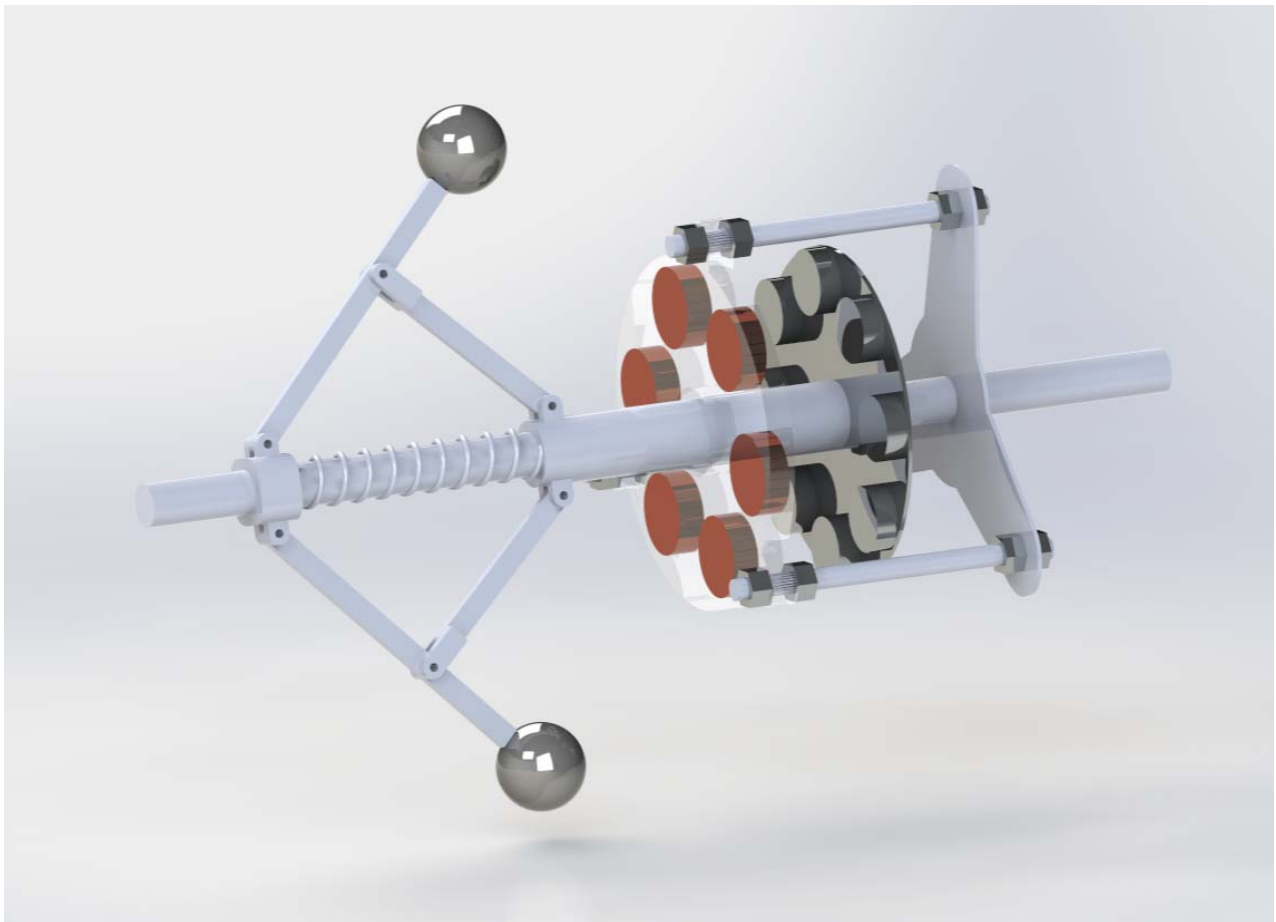


Fig. 3.41

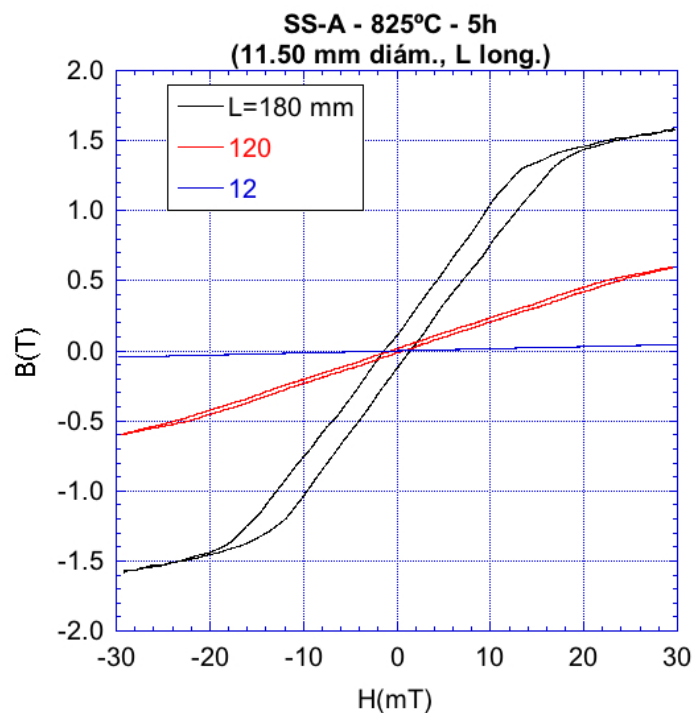
Esto permite que a velocidades bajas el par necesario para poner el movimiento el sistema no sea demasiado elevado, mientras que para altas potencias disponibles, pudiéramos permitirnos un aumento de par a fin de aumentar la potencia generada en mayor medida.

La función del muelle que se ilustra en la figura es la de mantener a los imanes alejados de las bobinas para velocidades bajas, ya que éstos tenderán a acercarse por la fuerza magnética que ejercen.

Hay que tener en cuenta que la fuerza que los imanes ejercen sobre los núcleos de hierro no es lineal sino más bien potencial, mientras que la fuerza ejercida por un muelle es lineal. Esto nos sugiere que el “muelle” utilizado debiera de presentar una función de fuerzas lineal respecto a la distancia. Esto podría conseguirse con dos imanes enfrentados entre sí por polos iguales.

También podría ser interesante investigar un sistema que compensara el par ejercido por la fuerza magnética de atracción entre los imanes y los núcleos. Una réplica añadida del sistema discos imanes-disco núcleos, pero esta vez sustituyendo los núcleos por imanes enfrentados por polos iguales al otro disco de imanes podría acercarse a la solución.

En cualquier caso, el comportamiento magnético de los núcleos utilizados es sin duda mejorable, como se muestra en la Fig. 3.42. Esta gráfica corresponde a las últimas mediciones tomadas en el laboratorio. Para ello se colocó el material en interior de un sistema carrete inductor-carrete detector. La señal de salida del carrete detector se envió a un integrador para la obtención de los datos que aquí se muestran. En ella se muestra el ciclo de histéresis del material utilizado para varias longitudes. La leyenda en azul corresponde a una muestra de una longitud cercana a los núcleos utilizados. Aquí se pone de manifiesto la importancia de la geometría de la muestra en el factor desimanador y éste a su vez en el comportamiento magnético del material.



3.42

Así pues se observa que la remanencia y el campo coercitivo son bajos, lo cual resulta interesante para nuestro propósito, pero el hecho de que la imanación adquirida sea tan baja hace que este comportamiento magnético esté lejos de la situación ideal.

A pesar de ello, el hecho de que los resultados experimentales que obtuvimos en el alternador con éstos núcleos fueran comparables en cuanto a potencia generada respecto a potencia necesaria con los resultados de los ensayos sin núcleos nos hace pensar que optimizando el material utilizado, éstos resultados mejorarían significativamente.

Bibliografía

- 1.- *Energia del Viento y Diseño de Turbinas Eolicas*. Bastianon R.A., , Editorial Tiempo de Cultura, Buenos Aires, 1ra. Ed. 1992 - 2da. Ed. 1994.
- 2.- *Transactions, Institute of Naval Architects*. Rankine W. J., Vol. 6., p. 13, 1865.
- 3.- *Die Windmühlen im Lichte Neuerer Forschung*. Betz A., *Naturwissenschaften*, XV , p. 905, 1927.
- 4.- *Theory of an Ideal Vane*. Sabinin G. K., *Trudy TsAGI*, 32, 1927.
- 5.- *Aerodynamics of Wind Turbines*. Hansen Martin O.L., Earthscan, London, 2ª Ed. 2008.
- 6.- *The elements of Aerofoil and Airscrew Theory*. Glauert H., Cambridge University Press, 1937
- 7.- *The Aerodynamic Layout of Wing Blades of Wind Turbines with High Tip-speed Ratio*. Hütter U., , *Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy*, Roma 7, p. 217, 1961.
- 8.- *Physics of magnetism*. S. Chikazumi, S.H. Charap. John Wiley & Sons, 1964
- 9.- *Introduction to magnetic materials*. B.D. Chullity. Addison-Wesley, 1972.
- 10.- *Temas de física III: electromagnetismo*. Salvador Velayos Hermida.
- 11.- *The theory of magnetism made simple*. D.C. Mattis. World Scientific Publishing, 2006.
- 12.- *Rare earth iron permanent magnets*. J.M.D. Coey. Oxford, 1996.
- 13.- *Homebrew Wind Power*. Dan Bartman & Dan Fink. Masonville, CO. 2009
- 14.- Patente de EE.UU. nº 3098776. *Methods of Heat-Treating Low Carbon Steel*. Paul F. Elarde. 23 de Julio de 1963.
- 15.- <http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/974514CE-0734-4404-AE56-E079DB5F3D0B/185478/PlanEnergeticodeNavarra2020definitivo1.pdf>
- 16.- www.gabi-software.com

Software utilizado

Microsoft Word

Microsoft Excel

GaBi

SolidWorks

Photo View 360

Autocad

Snagit Editor

Adobe Acrobat Pro

KaleidaGraph

Anexos

Data sheet article S-30-10-N

Technical data and application safety

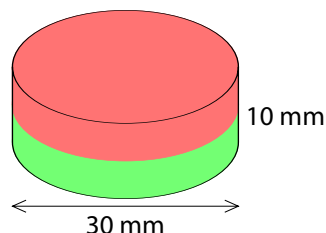
Webcraft GmbH
Industriepark 206
78244 Gottmadingen, Germany

Phone: +49 7731 939 839 2
Fax: +49 7731 939 839 9

www.supermagnete.es
support@supermagnete.es

1. Technical information

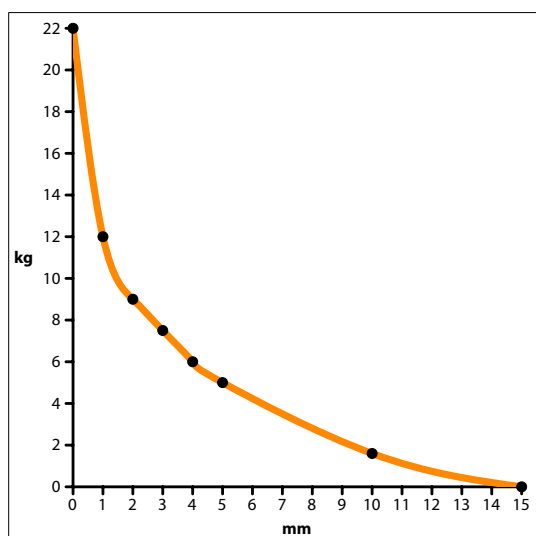
Article	S-30-10-N
Shape	Disc
Diameter	30 mm
Height	10 mm
Tolerance in size	+/- 0,1 mm
Direction of magnetisation	axial (parallel to height)
Material	NdFeB (Neodymium Iron Boron)
Type of coating	Nickel (Ni-Cu-Ni)
Strength	approx. 20 kg approx. 195 N
Weight	53,7212 g
Manufacturing method	sintered
Magnetisation (Grade)	N45
Max. working temperature	80°C
Curie temperature	310 °C
Residual magnetism Br	13200-13700 G 1.32-1.37 T
Coercive field strength bHc	10.8-12.5 kOe 860-995 kA/m
Coercive field strength iHc	≥12 kOe ≥955 kA/m
Energy product (BxH)max	43-45 MGOe 342-358 kJ/m ³



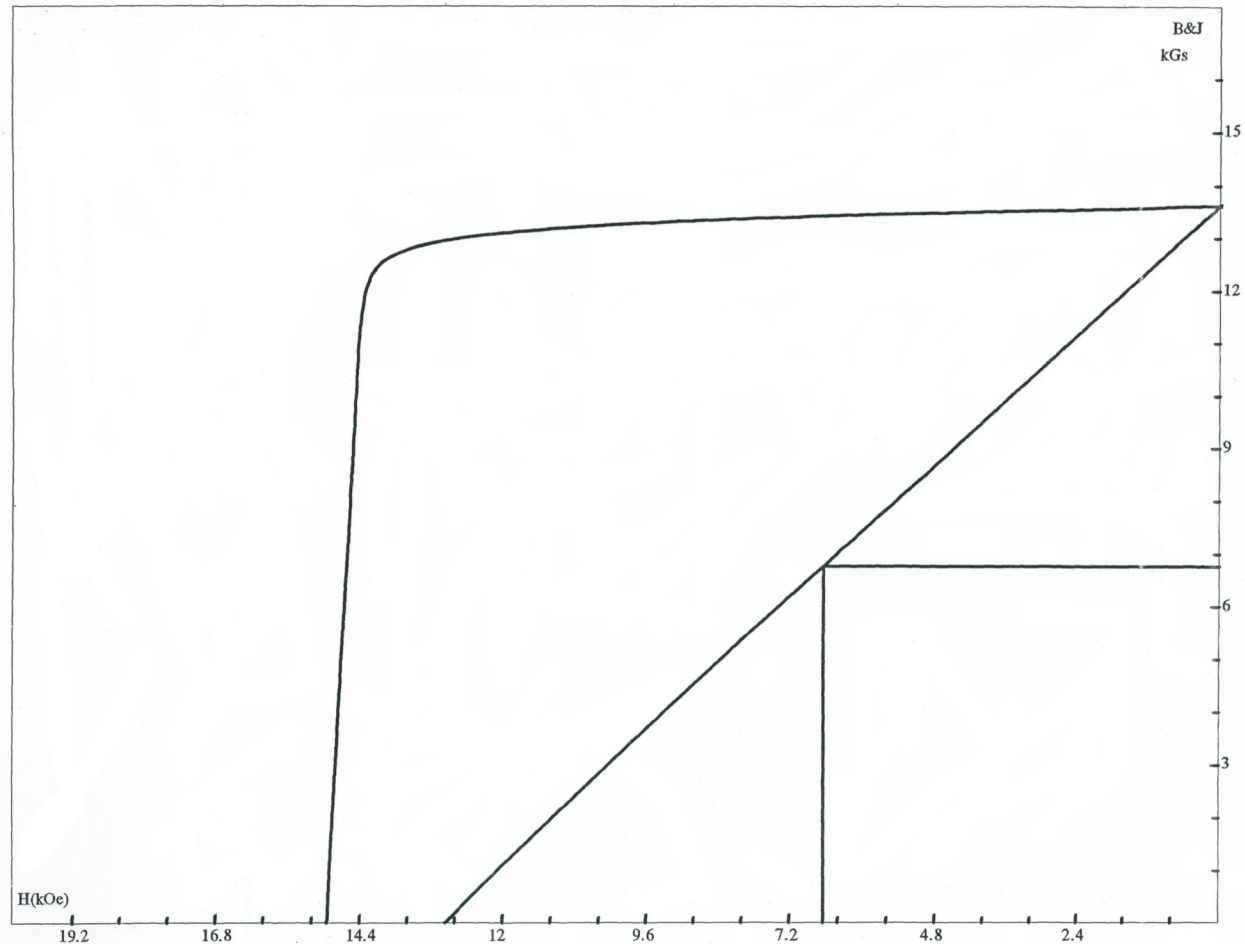
Pollutant-free according to RoHS Directive 2011/65/EU.
Exempt from registration according to REACH.

2. Adhesive force diagram




Adhesive force in relation to the air gap between magnet and steel plate.





3. Demagnetisation curve N45




4. Safety tips


<p>Danger</p> 	<p>Swallowing</p> <p>Children could swallow small magnets. If several magnets are swallowed, they could get stuck in the intestine and cause perilous complications.</p> <p>Magnets are not toys! Make sure that children don't play with magnets.</p>
<p>Warning</p> 	<p>Contusions</p> <p>Big magnets have a very strong attractive force.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unsafe handling could cause jamming of fingers or skin in between magnets. This may lead to contusions and bruises. • Powerful, very large magnets could cause bone fractures. <p>Wear heavy protective gloves when handling larger magnets.</p>
<p>Warning</p> 	<p>Pacemaker</p> <p>Magnets could affect the functioning of pacemakers and implanted heart defibrillators.</p> <ul style="list-style-type: none"> • A pacemaker could switch into test mode and cause illness. • A heart defibrillator may stop working. <p>If you wear these devices keep sufficient distance to magnets: www.supermagnete.es/eng/faq/distance</p> <p>Warn others who wear these devices from getting too close to magnets.</p>


<p>Warning</p> 	<p>Heavy objects</p> <p>Too heavy loads, symptoms of fatigue as well as material defect could cause a magnet or magnetic hook to loosen from the surface that it was attached to. Falling objects could lead to serious injuries.</p> <ul style="list-style-type: none"> • The indicated adhesive force applies only to ideal conditions. Allow for a high safety cushion. • Don't use magnets in places where people could sustain injuries in case of material failure.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------


<p>Warning</p> 	<p>Metal splinters</p> <p>Neodymium magnets are brittle. Colliding magnets could crack. Sharp splinters could be catapulted away for several meters and injure your eyes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Avoid the collision of magnets. • Wear safety glasses when handling larger magnets. • Make sure that nearby people are also protected or keep their distance.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------


5. Handling and storing




<p>Caution</p> 	<p>Magnetic field</p> <p>Magnets produce a far-reaching, strong magnetic field. They could damage TVs and laptops, computer hard drives, credit and ATM cards, data storage media, mechanical watches, hearing aids and speakers.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keep magnets away from devices and objects that could be damaged by strong magnetic fields. • Please refer to our table of recommended distances: www.supermagnete.es/eng/faq/distance
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Caution</p> 	<p>Combustibility</p> <p>When machining magnets, the drilling dust could easily ignite. Stay away from machining magnets or use appropriate tools and sufficient cooling water.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



<p>Caution</p> 	<p>Nickel allergy</p> <p>Many of our magnets have coatings that contain nickel.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Some people have an allergic reaction when they come into contact with nickel. • Nickel allergies could develop from constant contact with nickel-plated objects. • Avoid constant skin contact with nickel-plated magnets. • Avoid contact with magnets if you already have a nickel allergy.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Notice</p> 	<p>Influence on people</p> <p>According to the current level of knowledge, magnetic fields of permanent magnets do not have a measurable positive or negative influence on people. It is unlikely that permanent magnets constitute a health risk, but it cannot be ruled out entirely.</p> <ul style="list-style-type: none"> • For your own safety, avoid constant contact with magnets. • Store large magnets at least one metre away from your body.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Notice</p> 	<p>Splintering of coating</p> <p>Most of our neodymium magnets have a thin nickel-copper-nickel coating to protect them from erosion. This coating could splinter or crack due to collision or large pressure. This makes them vulnerable to environmental influences like moisture and they could oxidise.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Separate big magnets, especially spheres, with a piece of cardboard. • Avoid collisions of magnets as well as repeated mechanical exposure (e.g. blows, bashes).
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Notice</p> 	<p>Oxidation, corrosion, rust</p> <p>Untreated neodymium magnets oxidise quickly and disintegrate. Most of our magnets have a nickel-copper-nickel coating to protect them from corrosion. This coating provides some protection against corrosion, but it is not robust enough for continuous outdoor use.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Use magnets only in the dry indoors or protect them against environmental influences. • Avoid damages to the coating.
<p>Notice</p> 	<p>Temperature resistance</p> <p>Neodymium magnets have a maximum working temperature of 80 to 200 °C. Most neodymium magnets lose part of their adhesive force permanently at a temperature of 80 °C.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Don't use magnets in places where they are exposed to extreme heat. • If you use an adhesive, don't harden it with hot air.
<p>Notice</p> 	<p>Mechanical treatment</p> <p>Neodymium magnets are brittle, heat-sensitive and oxidise easily.</p> <ul style="list-style-type: none"> • When drilling or sawing a magnet with improper tools, the magnet may break. • The emerging heat may demagnetise the magnet. • The magnet will oxidise and disintegrate due to the damaged coating. <p>Stay away from mechanical treatment of magnets if you do not possess the necessary equipment and experience.</p>

6. Transportation tips

<p>Caution</p> 	<p>Airfreight</p> <p>Magnetic fields of improperly packaged magnets could influence airplane navigation devices. In the worst case it could lead to an accident.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Airfreight magnets only in packaging with sufficient magnetic shielding. • Please refer to the respective regulations: www.supermagnete.es/eng/faq/airfreight
<p>Caution</p> 	<p>Postage</p> <p>Magnetic fields of improperly packaged magnets could cause disturbances in sorting machines and damage fragile goods in other packages.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Please refer to our shipping tips: www.supermagnete.es/eng/faq/shipping • Use a large box and place the magnet in the middle surrounded by lots of padding material. • Arrange magnets in a package in a way that the magnetic fields neutralise each other. • If necessary, use sheet iron to shield the magnetic field. • There are stricter rules for airfreight: Refer to the warning notice "Airfreight".

7. Disposal tips

Small amounts of used neodymium magnets can be thrown out with the regular trash. Larger amounts of magnets need to be recycled as scrap metal.

8. Statutory provisions

Neodymium magnets are not intended for sale/export to the United States of America, Canada or Japan. You are strictly prohibited from directly or indirectly exporting the neodymium magnets that you received from us or the end products that you produced from those magnets to the countries mentioned above.

TARIC-Code: 8505 1100 33 0

Origin: China

For more information about magnets please review
www.supermagnete.es/faq.php.

Last update: 23/11/2011